

Title	ツリウム添加ファイバ増幅器の利得シフトと大容量波長多重光通信システムへの応用(Dissertation_全文)
Author(s)	笠松, 直史
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2003-03-24
URL	http://dx.doi.org/10.14989/doctor.r11203
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	author

ツリウム添加ファイバ増幅器の利得シフトと 大容量波長多重光通信システムへの応用

笠 松 直 史

内容梗概

本研究は、ツリウム添加ファイバ増幅器 (thulium-doped fiber amplifier; TDFA) の利得シフトと、その大容量波長多重光伝送システムへの応用に関するものである。第 1 章は序論であり、基幹系波長多重光ファイバ通信技術の歴史と現状を述べ、近年の爆発的なインターネット需要に対応するため、伝送容量の拡大を可能とする技術、特に波長帯域の拡大が求められている背景を述べる。この背景のもと、未開拓帯域であった波長 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯の実用的光ファイバ増幅器を構築すべく、通常は $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 帯に利得ピークを有する TDFA に着目し、 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯へと利得ピークを長波シフトする必要性を述べる。本研究の目的は、波長 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯の実用的な希土類添加光ファイバ増幅器を実現すること、ならびにその増幅器の大容量光伝送システムへの適用を通し、近未来の光通信システムでの容量拡大の一つの有力な手段を提供することにある。

第 2 章において希土類イオンを添加した光ファイバ増幅器の特徴を、エルビウム添加ファイバ増幅器 (erbium-doped fiber amplifier; EDFA) を例として簡単に説明する。特にエルビウムやツリウムの持つエネルギー準位構造、発光・吸収遷移の性質、EDFA の増幅原理などについて論ずる。そして EDFA で行われている C バンド (波長 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 帯) から L バンド ($1.58\text{ }\mu\text{m}$ 帯) への利得シフト動作について言及し、本質的に必要な条件が低反転分布であることを明らかにする。次に従来型 TDFA の動作原理を検討した結果、レーザ下準位数が零であり、本質的に高反転分布のため、利得シフト動作が不可能であることを示す。

そこで、先に明らかにした利得シフト動作の条件を満足するために、TDFA に対する新たな励起方式を提案する。この励起方式は、反転分布を形成する第 1 励起波長に加え、下準位数を増大させる第 2 の励起光 (波長 $1.56\text{ }\mu\text{m}$) を導入する 2 波長励起である。従来、TDFA はレーザ下準位数がほぼ零とみなせる 4 準位系であったものを、本励起方式により人工的に 3 準位系に近づけるのである。さらにその励起手法には、低雑音を実現する「低雑音励起方式 ($1.05\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$)」と光/光変換効率を向上する「高効率励起方式 ($1.4\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$)」との 2 種類あることを述べる。これらは、それぞれ EDFA で主に用いられている $0.98\text{ }\mu\text{m}$ 励起と $1.48\text{ }\mu\text{m}$ 励起にも通じる手法である。想定している伝送システムや用途によりどちらかを選択でき、場合により複合形態をも取り得るものである。さらにそれらの励起方式に対し、新たな励起光 $1.56\text{ }\mu\text{m}$ や、増幅された自然放出光 (Amplified spontaneous emission; ASE) の寄与などを取り込んだ完全なレート方程式を初めて構築する。

第 3 章では、第 2 章で提案された「低雑音励起方式 ($1.05\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$)」を適用した利得シフト TDFA において、 Tm ファイバ中の反転分布、利得・雑音指数の振る舞いを数値計算により明らかにし、低雑音励起 TDFA が第 2 章の着想どおり、3 準位系に近づいていること

を示す。そして光前置増幅に適する小信号動作、中継増幅と一括増幅に適する波長多重信号動作において、それぞれの増幅器構成と実験結果を述べる。さらに利得シフト TDFA の光/光変換効率について調べ、それが 9.1%であることを示す。この効率は、EDFA よりもはるかに低く、さらに理論効率よりも大幅に低いため、その理由を考察する。ここでの議論が、第 4 章での効率向上に向けた「高効率励起方式」の発案の布石にもなっている。

さらに半導体レーザでは実現困難な高出力 $1.05\ \mu\text{m}$ 励起光源を、半導体レーザ励起 Yb:YAG 固体レーザにより実現する提案・実証を行う。Yb:YAG レーザの分光学的特長と課題を明らかにし、ファイバ増幅器励起光源として非常に優れていることを説明する。そして励起光源として設計、開発し、出力 3 W 級 Yb:YAG レーザを実証する。また作製した Yb:YAG レーザを利得シフト TDFA および Er, Yb 共添加ファイバ増幅器に適用することで、その実用性を実証する。

第 4 章において、第 2 章で提案されたもう一つの励起方式、「高効率励起方式($1.4\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$)」について、第 3 章の結果を受けた発案指針を論じる。そして数値計算により、この励起方式の利得シフト TDFA が極めて 3 準位動作に近いことを明らかにするとともに、雑音指数の最小値を示す。続いて、利得シフト TDFA の増幅特性を実験的に明らかにする。光/光変換効率で 29.3%を達成できることが示され、低雑音励起方式に比べ大幅な改善(3.2 倍)を達成し、高効率励起方式の着想の妥当性を実証する。利得シフト TDFA の利得平坦動作を行い、光伝送に使用可能な平坦度 $\pm 1\ \text{dB}$ を達成すると共に、分散量 $600\ \text{ps/nm}$ の分散補償ファイバを段間に挿入することが可能であることも明らかにする。さらに変調速度 10 Gb/s 以上の高速伝送において重要になる偏波モード分散特性を明らかにし、利得シフト TDFA が、現時点で十分に先端光伝送システムへ適用可能な性能を有していることを示す。

第 5 章において第 3 章、第 4 章で得られた利得シフト TDFA を用い、従来帯域(C、L バンド)に加え $1.49\ \mu\text{m}$ 帯を用いた 3 波帯波長多重伝送を行う。まず変調速度 10 Gb/s により利得シフト TDFA を用い、システム性能を劣化させる過剰雑音が利得シフト TDFA において発生していないことを確認する。次に、100 nm を越える波長帯域幅での 3 波帯伝送においては、システム性能(伝送距離や容量)を制限する要因として、信号帯域間の誘導ラマン散乱が顕在化することを初めて指摘する。この実験を受け、変調速度を 40 Gb/s に引き上げ、波長多重数 273 波、周波数利用効率 $0.8\ \text{b/s/Hz}$ という超高密度かつ 10.92 Tb/s という超大容量波長多重伝送を試み、それに成功した結果を述べる。これらの実験を受け、利得シフト TDFA は、近未来に想定される伝送容量の拡大要求に対し、即応可能な強力な要素技術であり、その意義は大変高いことを示す。

最後に第 6 章において本研究で得られた主要な結果を総括し、今後の展望を述べる。

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.1.1 光ファイバ通信技術の現状	1
1.1.2 従来の光ファイバ増幅器の課題および新たな伝送帯域の必要性	4
1.2 本研究の目的	7
1.3 本論文の構成	10
参考文献	13
第2章 ツリウム添加ファイバ増幅器の利得シフト原理	16
2.1 まえがき	16
2.2 利得シフトの概念	16
2.2.1 固体中の希土類イオンの分光学的特性と増幅モデル	16
2.2.2 ファイバ増幅器における利得シフトの概念 - エルビウム添加ファイバ増幅器の場合	23
2.3 ツリウム添加ファイバ増幅器における利得シフト	27
2.3.1 ツリウムイオンの分光学的特性	27
2.3.2 従来のツリウム添加ファイバ増幅器と課題	28
2.3.3 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器を実現する新励起方式	30
2.3.4 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器の数値モデル	32
2.4 まとめ	40
参考文献	41
第3章 低雑音励起方式 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器	45
3.1 まえがき	45
3.2 反転分布の数値解析	45
3.2.1 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA	45
3.2.2 低雑音励起 (1.05 μm /1.56 μm) 利得シフト TDFA	48
3.3 実験構成	49
3.4 増幅特性と考察	51
3.4.1 増幅自然放出光の長波シフト	51
3.4.2 基本増幅特性	52
3.4.3 単一信号増幅における利得シフト動作特性	58
3.4.4 波長多重信号増幅における利得シフト動作特性	63
3.4.5 高速光伝送システムへの適用可能性	69

3.5 ツリウム添加ファイバの信頼性	72
3.6 伝送実験用試作装置	73
3.7 新しい励起光源の提案	75
3.7.1 開発の背景	75
3.7.2 イッテルビウム分光学的特性	77
3.7.3 半導体レーザ励起イッテルビウム固体レーザの設計	79
3.7.4 実験構成とレーザ出力特性	87
3.7.5 ファイバ増幅器への応用	92
3.7.6 実用装置への展望 - 装置寿命 -	95
3.8 まとめ	95
参考文献	97
 第4章 高効率半導体レーザ励起方式 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器	 101
4.1 まえがき	101
4.2 高効率半導体レーザ励起方式の発案指針	101
4.3 反転分布の数値解析	103
4.4 実験構成	106
4.5 増幅特性と考察	107
4.5.1 増幅自然放出光のスペクトル	107
4.5.2 基本増幅特性	107
4.5.3 単一信号増幅における利得シフト動作特性	112
4.5.4 波長多重信号増幅における利得シフト動作特性	114
4.6 偏波モード分散 (PMD) 特性	120
4.7 高効率励起方式におけるツリウム添加ファイバの信頼性	123
4.8 伝送実験用試作装置	123
4.9 低雑音励起方式との比較および最適構成	124
4.10 まとめ	124
参考文献	126
 第5章 超大容量波長多重伝送への応用	 127
5.1 まえがき	127
5.2 変調速度 10 Gb/s における 3 波帯無中継伝送実験	127
5.2.1 実験構成	127
5.2.2 実験結果と考察	129
5.3 変調速度 40 Gb/s における 3 波帯超大容量伝送実験	131

5.3.1 実験構成	131
5.3.2 実験結果と考察	133
5.4 実用大容量伝送に適用する際のツリウム添加ファイバ増幅器への要求	134
5.5 まとめ	137
参考文献	138
第 6 章 結論	141
謝辞	145
付録	146
本研究に関連する発表	158

第 1 章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 光ファイバ通信技術の現状

現在、いわゆる「インターネット」が爆発的に普及して来ている。インターネットは、大型コンピュータを用いたパソコン通信と比べ、格段の使いやすさと世界性を有している[1]。文字情報だけでなく、画像や音声入りの電子メール、WWW 閲覧 (World Wide Web)、インターネット電話、そして音楽・映像配信などの様々なサービスが行われるようになっている。一般家庭 (すなわち加入者アクセス網) でのデータ通信速度は、当初のアナログ回線 (56 kbit/sec; 以下 kb/s と略す) からサービス総合デジタル網 (Integrated services digital network; ISDN、64 kb/s ~ 1.5 Mbit/sec; Mb/s) そして非対称デジタル加入者線 (Asymmetric digital subscriber line; ADSL、1.5 ~ 8 Mb/s) やケーブルテレビ網へと高速化してきており、一昔前のローカルエリアネットワーク並みになって来ていると言える[2]。これらのアクセス網の高速化は、インターネットの進展とともに相補う形で加速してきた。既に国内では 2000 年前後にインターネットを用いたデータ通信量は、電話などの音声通信量を凌いでおり、今後はさらに伸びていくものと考えられる[3]。

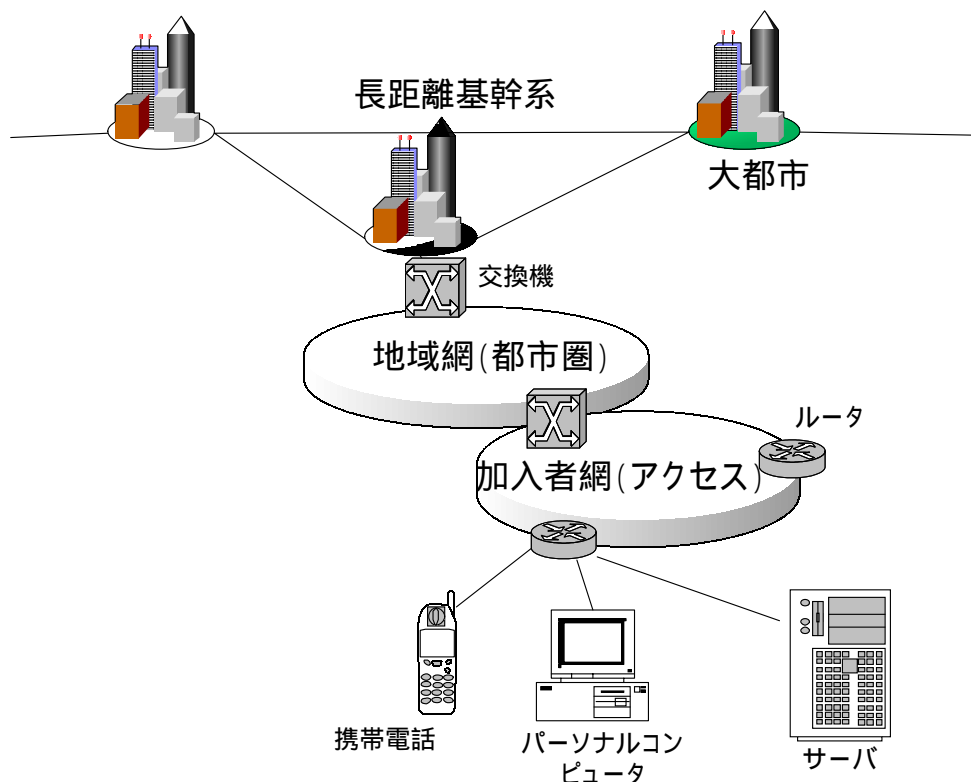


図 1-1 通信ネットワークの構造の模式図

では、これからの通信ネットワークにはどのような将来像が描けるだろう。ネットワークは今後ますます高性能、大容量、高機能化していくものと考えられる。現状の通信速度は、ユーザがインターネットの恩恵を初期的に蒙ることができる程度には至ったが、本格的な活用のためには満足のいくものではない。例えば、大容量映像データを快適にダウンロードできる速度は 30 ~ 100 Mb/s クラスであり、さらにハイビジョンクラスの高品位画像を送信するには Gbit/sec (Gb/s) クラスが必要とされている。また離島や過疎地などに向けて遠隔医療を行う場合、レントゲン写真を高精度に送受することが日常の診断で必要であるが、現在の画像解像度では不満足である。このような状況を受け、2001 年 3 月に政府の高度情報通信戦略本部 (IT 戦略本部) が「e-Japan 重点計画」を発表し、2005 年までに少なくとも 1000 万世帯が超高速インターネットアクセス網 (30 ~ 100 Mb/s) に接続できる環境を作することを提唱している[4, 5]。

これらの情報通信を取り巻く潮流の中、基幹系ネットワークもこれまで以上に大容量高速化を図らなければならない。なぜなら 100 万世帯で高速映像配信を同時に享受したとすると、30 Tb/s 容量を確保する必要があるためである。「基幹系」とは大都市間を結ぶ情報の主要伝送路であり、現在「光ファイバ通信技術」により支えられている。図 1-1 に基幹系、地域網 (都市圏)、加入者網 (アクセス) の 3 階層のネットワーク構造を模式的に示す。より高速に、より大量の情報を伝送する光ファイバ通信網は、人々により豊かな未来をもたらすものとして、全世界的に整備が進められている。

現在、光ファイバ通信技術は石英ファイバの最低損失帯域 (中心波長 1.55 μm) を伝送帯域として用いており、この帯域内に複数の異なる波長を持つ光信号を多重 (波長分割多重または波長多重とも言う。wavelength-division multiplexing; WDM) して伝送している。図

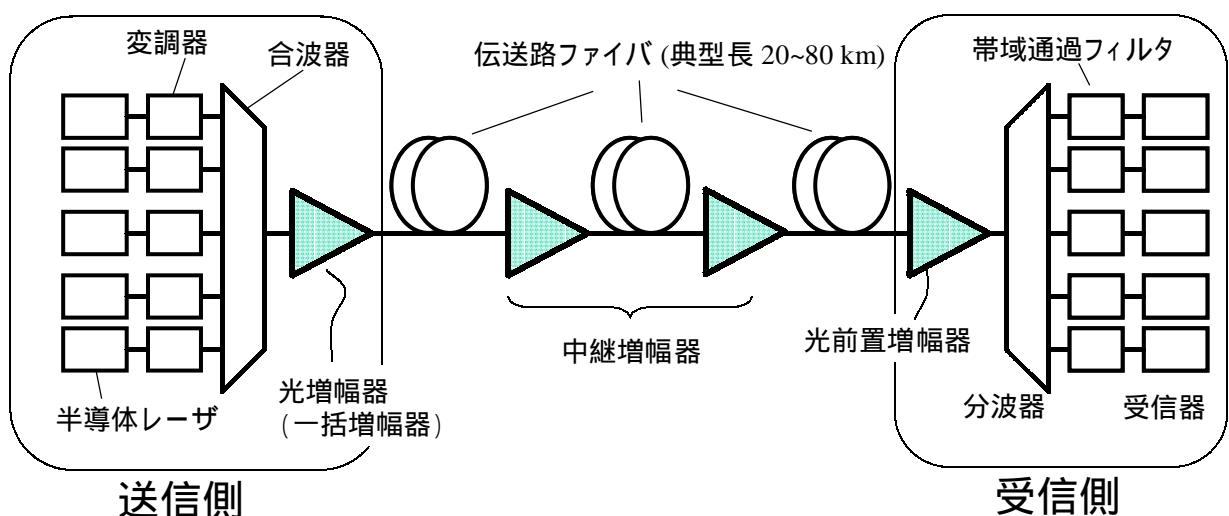


図 1-2 波長分割多重 (WDM) 光ファイバ通信システムの構成図

1-2 に典型的な光通信システムの構成を示す。半導体レーザからの連続光は変調器によりデータ信号を重畳され、波長多重された後、光増幅器により一括増幅され、伝送路ファイバへと送出される。ファイバを 20～80 km（これをスパンと言う）伝搬後、光増幅器を内部に含む中継器（リピータ）にてファイバ伝搬損失を補償すべく光増幅が行われる。光増幅器の発明以前（1980 年代後半以前）は、中継器において光信号から電気信号へと変換し、伝送にともなう波形歪、信号パワーの減少およびタイミングずれを補償し、再度、光信号へと変換し伝送路へ送出していた。これを 3R 再生中継〔3R とは、re-timing（タイミング適正化）re-shaping（等化増幅）re-generation（識別再生）の頭文字〕という。しかし 1980 年代後半に開発されたエルビウム添加光ファイバ増幅器（erbium-doped fiber amplifier; EDFA）により、3R 再生中継器は終端部を除き駆逐された[6]。EDFA は 3R 機能のうち 1R（re-shaping）に相当する信号パワーの線形増幅のみしか行わないが、以下の優れた特長を有する。

- 高性能：高利得（～30 dB）、低雑音（≤5 dB）、高効率（40～60%）、高出力（～+25 dBm）
- 広帯域：1.55 μm 帯にて 50 nm 以上（～6 THz）の波長帯域。
- 既存システムとの高い親和性：ファイバ形状のため、既存の光ファイバ通信システムへ接続しやすい。
- 拡張性：信号ビットレートに無依存かつ多波長一括増幅可能。

このため、現在の光ファイバ通信において EDFA は絶対不可欠なものになっている。

なおここで、一括増幅器、中継増幅器、光前置増幅器の仕様の違いについて述べる。表 1-1 に一般的な要求項目を示した。特に光前置増幅器では受信感度向上のため低雑音が要求される。一括増幅器と中継増幅器では、光信号対雑音比（光 SN 比）を向上するため送信出力増大が必須であり、高出力が望まれる。また中継器間隔増大のため高利得も望まれ、一般的に高効率であることも必要である。これらの要求項目の違いにより、最適なファイバ増幅器構成（励起波長、多段構成の段数など）も変わってくる。

表 1-1 一括増幅器、中継増幅器、光前置増幅器の要求項目

性能項目	一括増幅器	中継増幅器	光前置増幅器
利得			
出力			～
雑音指数	～		
効率			～
目的	送信出力の増大	増幅中継	受信感度の改善

：不可欠、：必要、：あると望ましい。

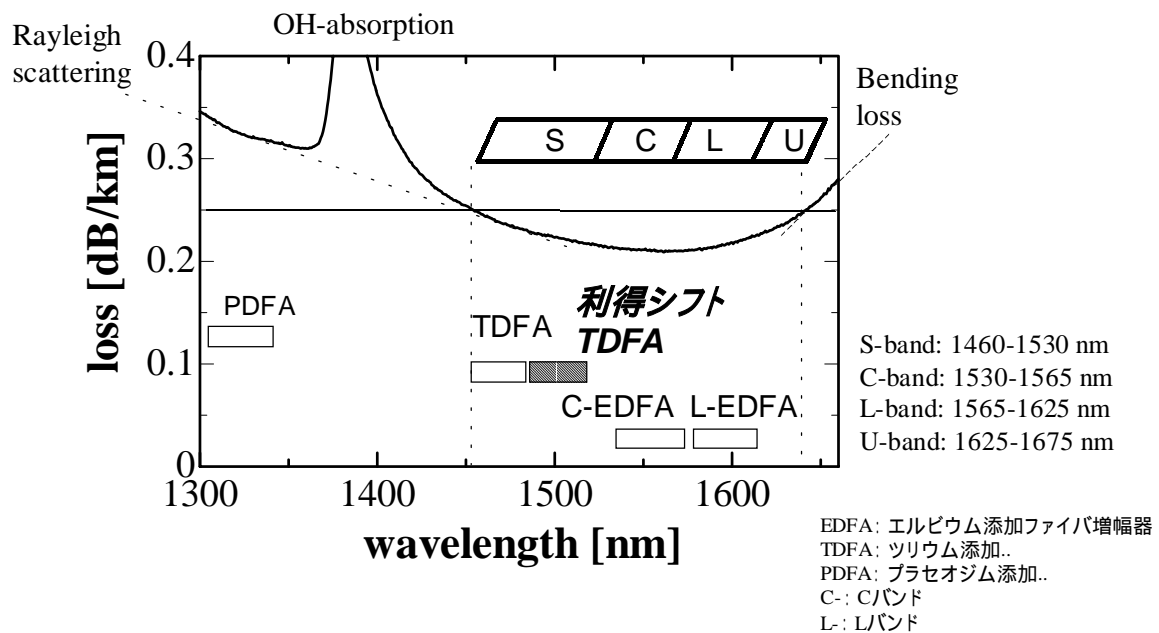


図 1-3 代表的な伝送路光ファイバの損失スペクトルと光ファイバ増幅器の利得帯域およびバンド呼称[7]

1.1.2 従来の光ファイバ増幅器の課題および新たな伝送帯域の必要性

図 1-3 に代表的な伝送路光ファイバの伝搬損失の波長依存性、光ファイバ増幅器の利得帯域、および ITU-T (国際電気通信連合 電気通信標準化部門) により定められたバンド呼称を示す[7]。先に述べた EDFA は通常 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯、波長帯域 $1530\sim 1565\ \text{nm}$ (C バンド) で用いられる。EDFA は Er イオンの蛍光スペクトルのピーク付近を利用したデバイスであり、古くから知られていた。

希土類イオンを添加した光増幅 (レーザを含む) や、光ファイバ形状でのレーザ動作のアイデアは古く、1960 年の Maiman によるレーザの発明[8]の直後にまで遡る。1961 年には、Snitzer により光ファイバ導波路によるレーザ共振器が、1964 年にはネオジム(Nd)添加ファイバレーザが提案・実証されている[9, 10]。しかしながら、かなり大きな光励起パワーが必要であったことなどが理由で、その後しばらく実用デバイスへは進展しなかった。本格的な研究開発が再開されたのは 1980 年代後半のことである[11-13]。英サザンプトン大[14, 15]、米 AT&T 社[16]、米ポラロイド社[17]、そして日本の NTT[18]が中心となり、低損失な Er 添加シングルモードファイバの製造法や高効率な半導体レーザ励起手法などが確立された。1989 年には $1.48\ \mu\text{m}$ 帯 InGaAsP 半導体レーザを用い、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ で $12.5\ \text{dB}$ の利得が得られた[18]。そして同年の光ファイバ通信国際会議 (Optical Fiber Communication Conference; OFC)において、NTT の萩本等は、信号光源の直後に配置した一括増幅器および光受信器直

前に配置した光前置増幅器として EDFA を用いた 1.8 Gb/s 無中継伝送において、従来の増幅器なしの直接検波システムはおろか、それまで最長到達距離を誇っていたコヒーレント伝送をも凌駕する無中継伝送距離 212 km を達成した[19]。これは EDFA の有する本質的な低雑音性が、受信感度を 5.9 dB も向上できたことに起因する画期的なものである。

この成功を契機に、ファイバ、部品、装置・システムのメーカーそして通信会社、大学、国立研究機関を巻き込んだ空前の大変革が光通信システムの研究開発に起こった。C バンドの EDFA は、理論と実験の両面の急速な進展を見せ、伝送システムへの実験的適用という開発段階を経て、1994～1995 年には中継器間隔 80 km、総伝送距離 640 km の陸上光通信システム（伝送速度 2.5 Gb/s または 10 Gb/s、FA-2.4G および FA-10G）[6, 20]、1995 年には世界初の海底ケーブルシステム（伝送速度 600 Mb/s）が鹿児島 - 沖縄間（905 km）で運用開始された[11]。現在では、陸上系で最大容量 1.6 Tb/s クラス（変調速度 10 Gb/s、チャンネル数 160；後述の L バンド EDFA 帯域も使用）が、海底系では主要大陸間を結ぶ数千 km から 1 万 km におよぶ超長距離伝送システムが実用化されている。

一方 1997 年ごろから、EDFA の動作条件の一つである反転分布率を低く設定し（反転分布率の定義は第 2 章にて述べる） E_r の蛍光スペクトルの長波側の裾野を利用しようとする試みが NTT より報告され、1565～1625 nm の長波帯（L バンド）の開拓が進んだ[21]。この動作を「利得シフト」という。もともと低反転分布を利用するアイデアは、1990 年に英ブリティッシュテレコム（BT）の Massicott らが長尺 EDFA と反転分布低減のための 1.55 μm 励起光を用いて L バンド動作を実現したのが最初である[22]。しかし当時、容量拡大の要求に対し、C バンドを使い切ることなど誰もが予想だにせず、波長多重通信出現以前であったこと、またインターネット普及以前でもあったことなどの歴史的背景から、当時はあまり注目を浴びなかった。

ところが冒頭に述べたインターネットの爆発的普及は状況を一変させ、温故知新ともいえる L バンド EDFA の開発に、1997 年から本格的に各メーカー、研究機関がこぞって参入した。L バンド EDFA は、従来からある C バンド EDFA のファイバ長を 10 倍程度に長尺化することで比較的容易に実現でき、その他の光部品（励起波長と信号波長を合波する波長多重カップラや、発振を抑制する光アイソレータなど）も従来技術の援用により実現できたため、急速に開発が進み、わずか 3 年ほどの間に商用システムへの導入にまでこぎついた。C バンドに加え L バンドの光信号を波長多重伝送することで、容量を 2 倍に増大することが可能になった。また特に分散シフトファイバが全国に敷設されている日本国内では、零分散波長である C バンドでの波長多重伝送を行うと、信号チャネル間の群速度が一致し、非線形相互作用（4 光波混合や相互位相変調）が顕著に起きて、信号品質の劣化を引き起こす

ことが知られている[23]。そこで、信号波長を非零分散の L バンドに設定することで、その非線形劣化が著しく緩和されることも L バンド波長多重伝送の特長の一つである。

そして現在、なお予測される将来の伝送容量不足に備え、C、L バンドを使い切った後の近未来システムの研究が盛んに行われて来ている。一つはチャネルの変調速度を商用システムにおける最速の 10 Gb/s から 40 Gb/s へと高速化することである。特に 40 Gb/s は現状の電子回路技術の援用により実現可能であるため、次世代システムの最有力候補として注目されている。昨今の光ファイバ通信国際会議(OFC)や欧州光通信会議 (European Conference on Optical Communications; ECOC)では、伝送容量・距離という伝送システム性能を表す指標での、熾烈な競争が繰り広げられている。既に変調速度 40 Gb/s では、伝送容量 5.1~6.4 Tb/s が実験室レベルで実現されてきた[24, 25]。

もう一つの容量増大の方向は、帯域を拡大することである。伝送帯域内に信号を詰め込む効率を表す周波数利用効率の理論限界は、ナイキストの定理より符号間干渉が零になる条件を考察すると、2 値強度変調 - 直接検波で偏光を使わない場合に、1.0 b/s/Hz (偏光を使う場合 2 b/s/Hz) になることが示されている[26, 27]。最近の高密度波長多重伝送実験では、既に 0.8 b/s/Hz に到達しており、理論限界に近づいている[24]。従って、周波数利用効率が一定の条件において、伝送容量の拡大のためには帯域拡大が必要である。そして新たな帯域を伝送システムに供するためには、新たな光増幅器が必要である。しかもその帯域は、石英ファイバの低損失帯域 (1450 ~ 1650 nm) の範囲内にあるべきである。この低損失帯域外では、既存の伝送路の伝送損失が波長により大きく異なり、伝送後の信号対雑音比が波長により大きく異なる結果、伝送品質が一様でなくなるという問題が生じるためである。

図 1-3 に示されているツリウム添加ファイバ増幅器 (thulium-doped fiber amplifier; TDFA) は、S バンドの短波側 1.47 μm 帯 (1450~1480 nm) において高利得、低雑音が実現できることが報告され、この帯域を用いた伝送実験も 1999 年に報告された[28]。しかしながら現実の伝送システムへの導入を考慮すると、1.47 μm 帯と EDFA の帯域の間に存在し、1.47 μm 帯よりも低損失である、「未開拓帯域 1.49 μm 帯 (S バンド長波側 ; 1480~1510 nm)」での光増幅器の実現が切望されていた。この帯域は EDFA 帯に次ぐ低損失帯域であり、伝送システムの伝搬損失設計を変更することなく、既存システムへ追加することが出来るという特長を有する。しかし、この帯域の希土類添加光ファイバ増幅器は実現されていなかった。一般的に希土類添加光ファイバ増幅器では、増幅利得帯域は希土類イオンの発光スペクトルにより決定されており、この帯域にピーク利得を有する希土類イオンは存在しないからである。一方、任意の波長領域に利得を生成できる技術として、半導体光増幅器 (Semiconductor optical amplifier; SOA) [12, 29]やラマン増幅器 (Raman amplifier) [30]が挙

げられるが、利得、雑音指数、出力、効率、非線形効果などの主要性能の点で、共に希土類添加ファイバ増幅器に対して劣るため、実用的な中継器に用いるには性能不足であると考えられる。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、波長 $1.49\ \mu\text{m}$ 帯の実用的な希土類添加光ファイバ増幅器を実現すること、ならびにその増幅器の大容量伝送システムへの適用を通し、近未来の光通信システムでの容量拡大の一つの有力な手段を提供することにある。

本研究では第 1 段階として、波長 $1.49\ \mu\text{m}$ 帯の実用的な希土類添加光ファイバ増幅器を実現することを試みた。「実用的」とは、増幅器の基本性能（利得、雑音指数、飽和出力そして光/光変換効率など）が十分に高いレベルを発揮していると同時に、小型で、半導体レーザ励起方式を可能とし、長期的にも安定な動作特性が得られることを意味する。

基本的な進め方は以下のようなものである。すなわち、通常は波長 $1.47\ \mu\text{m}$ で動作するトリウム添加ファイバ増幅器（TDFA）に着目し、その反転分布率を低減させることで長波側の $1.49\ \mu\text{m}$ 帯へ利得シフトすることである。これを「利得シフト・トリウム添加ファイバ増幅器（利得シフト TDFA ; gain-shifted TDFA）」と呼ぶ。第 2 章でその原理を詳しく説明するが、ちょうど EDFA の利得シフトを行うことで L バンド EDFA を実現することと、物理的には等価なことである。TDFA の動作原理に関する詳細な考察から、その実現手法として新たな励起方式を 2 種類発案する。それぞれ（1）低雑音増幅、（2）高効率増幅を可能とするものである。特に後者は市販の半導体レーザでの励起を可能とする極めて実用的な手法でもある。

さらに第 2 段階として、利得シフト TDFA の大容量波長多重伝送システムへの適用可能性を検証した。まず C、L バンドに波長 $1.49\ \mu\text{m}$ 帯を加えた変調速度 $10\ \text{Gb/s}$ の 3 波帯伝送を行う。この実験を通して利得シフト TDFA が過剰雑音を発生しないことを確認するとともに、3 波帯伝送における伝送技術の課題を抽出する。そして変調速度を $40\ \text{Gb/s}$ に引き上げ、波長多重数 273 波を用いた総伝送容量 $10.92\ \text{Tb/s}$ （2002 年 4 月現在で世界最大）の光中継伝送実験を行う。これらの実証実験を通して、利得シフト TDFA が先進的な光伝送システムに対し十分適用可能であることを示す。

以下に本研究で達成された成果をより詳しくまとめ、その意義付けを行う。

1) 実用的な $1.49\ \mu\text{m}$ 帯希土類添加光ファイバ増幅器の実現

1-1) トリウム添加ファイバ増幅器における利得シフト動作の実現

本研究開始当時、波長 $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯は全くの未開拓帯域であり、現在でも、この帯域でピーク利得を有する希土類添加ファイバ増幅器は発見、開発されていない。このような状況から、まず本研究の第一の目的は、短波側の $1.47\text{ }\mu\text{m}$ で動作する TDFA を選択し、その利得を長波側にシフトすることにある。

本研究で、TDFA の動作機構を詳細に検討した結果、従来からの TDFA では、下準位数がほぼ零になり(4 準位動作という) 利得シフト動作が実現出来ないことが明らかになった。そこで、反転分布を形成する励起光(第 1 励起光)に加え、下準位数を増大させる励起光(第 2 励起光)を使用し、利得シフトを実現する励起方式を新たに 2 種類考案した。すなわち「低雑音励起方式($1.05\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$ の 2 波長励起)」と「高効率励起方式($1.4\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$ の 2 波長励起)」である。

この発案は、基礎物理まで遡って考察した結果に立脚している。そのため、ここで提案された手法は TDFA に限らず、しかもファイバ増幅器にも限定されず、自己終端型遷移を有するあらゆる希土類添加デバイス全般に広く適用可能で、非常に汎用性の高い励起手法である。すなわち、これまで EDFA でしか実現できていなかった利得シフトが、基底準位より上位にある 2 つのエネルギー準位間の誘導遷移において実現できることを意味する。このような誘導遷移は、紫外($<400\text{ nm}$)から中赤外($\sim 3\text{ }\mu\text{m}$)の幅広いスペクトル領域において、様々な希土類添加デバイスを利用して実現されており、その遷移の発光スペクトル制御を行えることは、産業のみならず学術面においても高い意義を有する。と同時に、未開拓の遷移に対しても強力な探索手段となり得る。

1-2) 利得シフト TDFA の実用性向上

考案された励起方式による利得シフト TDFA は、従来からの TDFA とは全く異なる動作をすることを明らかにした。具体的には、従来型 TDFA($1.05\text{ }\mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA) が 4 準位系に近い動作で、下準位数はほぼ零であるのに対し、利得シフト TDFA は EDFA などの 3 準位系に近いことである。3 準位系と 4 準位系は、飽和出力、利得、雑音指数などの増幅特性に大きな違いがある。

そして動作機構が異なるため、実用的な増幅器に必要な性能(高利得、低雑音、高出力、高効率など)を実現するファイバ増幅器構成も、従来の TDFA とは異なり、新たなものになる。本研究では、利得シフト TDFA 構成の最適化を行い、実用に耐えうる性能を実現した。特に実用的な光伝送システムで課題となる、光増幅器の光/光変換効率(励起光パワーから信号光パワーへのパワー変換比率)の把握ならびに改善、利得平坦動作の実現、段間に装着する分散補償ファイバの許容最大損失の把握などを行った。ここで行われた実験に

より、利得シフト TDFA の光伝送システムへの適用可能性が著しく向上した。また偏波モード分散や Tm ファイバの信頼性についても、多くはファイバメーカーの開発案件であるが、本研究で仕様を明示し、新規開発を行うことで解決してきた。

1-3) 利得シフト TDFA の数値設計手法の確立

本研究開始時には、利得シフト TDFA はおろか、従来型 TDFA の理論計算モデルさえも整備されていない状況であった。このため本研究で TDFA の数値モデルを新たに構築し、従来型 TDFA と利得シフト TDFA の双方について、理論的な解析を行った。以前より従来型 TDFA そのものについても、3 準位動作か 4 準位動作か議論が分かれていた。本研究でこの議論に終止符を打つべく、初めて理論的解析を行い、その動作の本質を明らかにした。

計算を進めた結果、実験結果として述べられていた「従来型 TDFA の 4 準位動作」を理論的に実証するとともに、「利得シフト TDFA の 3 準位動作」を精度よく説明することに成功した。これは本研究の着想の妥当性を示している。また利得シフト TDFA の雑音指数について、達成可能な雑音指数を計算することで、性能限界を明らかにした。

ここで構築した数値モデルは、さらに種々多様な光伝送システムへ利得シフト TDFA を適用する際の、性能予測のための強力な道具立てにもなっている。

1-4) 新たな 1.05 μm 帯励起光源の提案・実証

利得シフト TDFA を実現する励起方式のうち、「低雑音励起方式」は波長 1.05 μm の励起光源を必要とする。しかしながら、この波長の高出力励起光源は現在市販されておらず、出力 1 W 級は研究開発段階でも実現されていない。従来は、信頼性や実用性が低い Nd:YAG 固体レーザ等が用いられてきた。本研究では、利得シフト TDFA の実用性向上には、励起光源の実用性向上が必須であると考え、分光学的考察から、半導体レーザ励起 Yb:YAG 固体レーザが 1.05 μm 帯の高出力励起光源として適していることを提案した。そして出力 3 W 級を有する半導体レーザ励起 Yb:YAG 固体レーザをファイバ増幅器用に新たに設計、開発し、ファイバ増幅器へ適用することで、その実用性を実証した。

2) 利得シフト TDFA の大容量光伝送への適用

1) で開発した実用的な利得シフト TDFA を波長多重伝送に適用することで、高速伝送に耐えうる性能かどうかを検証した。また世界に先駆け、従来帯域の C、L バンドに加え 1.49 μm 帯を合わせた 3 波帯伝送を行うことで、伝送技術における課題を明らかにした。この実験を受け、それまで最大 6.4 Tb/s であった伝送容量[24]を、一気に 1.5 倍に引き上げ、世界

で初めて総容量 10 Tb/s を超えた 10.92 Tb/s 光伝送を実現した。これは利得シフト TDFA が存在することで初めて達成可能な容量である。本研究開始当初は、果たして 10 Tb/s もの信号を正常に伝送できるか否かは、実証試験のみが示しうる課題であったが、この実験の成功により、莫大な容量を必要とする近未来光通信システムの実現、そしてその先にある、高機能フォトニックネットワーク構築へと大きく前進したと言える。

1.3 本論文の構成

各章の内容をまず簡単に述べる。第 2 章において、TDFA の利得シフトの原理、利得シフトを実現する 2 つの励起方式、さらにそれらの数値モデルについて述べる。第 3 章において、考案した励起方式の一つである「低雑音励起方式 (1.05 μm /1.56 μm)」を用いた低雑音利得シフト TDFA の原理、実験結果、および数値計算による検証について述べる。またファイバ増幅器の新たな励起光源として波長 1.05 μm 帯の半導体レーザ励起 Yb:YAG 固体レーザを提案し、その特長、設計および試作について述べる。第 4 章において、第 2 の励起方式である「高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm)」を用いた高効率利得シフト TDFA について、高効率動作の実証実験、数値計算による検証について述べる。第 5 章において、開発した利得シフト TDFA を用いた波長多重光伝送システムの実証実験について述べる。最後に第 6 章において、本研究において得られた結論をまとめる。

以下に詳しく述べる。

【第 2 章】ツリウム添加ファイバ増幅器の利得シフト原理

まず希土類イオンを添加したファイバ増幅器の特徴を、EDFA を例として簡単に説明する。特に Er や Tm の持つエネルギー準位構造、そして発光・吸収遷移の性質、EDFA の増幅原理などについて述べる。そして EDFA で行われている利得シフト動作について説明し、本質的に必要な条件が低反転分布率 (およそ 0.4) であること明らかにする。次に Tm イオンを用いた、従来型 TDFA の動作原理を検討し、従来型 TDFA では、レーザ下準位数が零の 4 準位動作のため、利得シフト動作が不可能であることを示す。

そこで、先に明らかにした利得シフト動作の条件を満足するために、TDFA に対する新たな励起方式を提案する。この方式は、従来型 TDFA はレーザ下準位数がほぼ零とみなせる 4 準位系であったものを、下準位数を増大させる第 2 の励起光 1.56 μm を導入することで人工的に 3 準位系に近づけるものである。さらにその励起手法には、低雑音を実現する「低雑音励起方式」と光/光変換効率を向上する「高効率励起方式」との 2 種類あることを論じる。

これらは、それぞれ EDFA で主に用いられている $0.98\ \mu\text{m}$ 励起（低雑音励起）と $1.48\ \mu\text{m}$ 励起（高効率励起）にも通じる手法であり、用途や想定している伝送システム仕様により、どちらかを選ぶか、あるいはその複合形態をも取り得るものである。

さらにそれらの励起方式に対し、新たな励起光（第 2 励起光 $1.56\ \mu\text{m}$ ）や、増幅された自然放出光（Amplified spontaneous emission; ASE）の寄与などを取り込んだ完全なレート方程式を初めて構築する。

【第 3 章】低雑音励起方式 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器

第 2 章で提案された「低雑音励起方式」を TDFA に適用し、ファイバ中の利得、雑音指数の振る舞いを、まず数値計算により明らかにする。そして利得シフト TDFA において、光前置増幅に適する小信号増幅動作、一括増幅と中継増幅に適する波長多重信号増幅動作において、それぞれの増幅器構成、実験結果を述べる。さらに利得シフト TDFA の光/光変換効率について調べ、それが 9.1%であることを示す。この効率は EDFA よりもはるかに低く、さらに理論効率よりも大幅に低いため、原因を考察する。ここでの議論が、第 4 章での効率向上に向けた「高効率励起方式」の発案の布石にもなっている。

さらに、半導体レーザでは実現困難な高出力 $1.05\ \mu\text{m}$ 励起光源を、半導体レーザ励起 Yb:YAG レーザにより実現する提案・実証を行う。まず Yb:YAG レーザの分光学的特長と課題を明らかにし、ファイバ増幅器励起光源として非常に優れていることを説明する。実際に励起光源として設計開発し、出力 3 W 級の実現する。また作製した Yb:YAG レーザを利得シフト TDFA および Er, Yb 共添加ファイバ増幅器に適用することで、その実用性を実証する。

【第 4 章】高効率半導体レーザ励起方式 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器

第 2 章で提案されたもう一つの励起方式、「高効率励起方式」について、第 3 章を受けた発案指針を詳細に論じる。そして数値計算により、この励起方式の利得シフト TDFA が低雑音励起利得シフト TDFA よりもさらに 3 準位動作に近いことを明らかにする。また雑音指数の最小値を示す。

次に高効率励起方式を適用し、増幅特性を実験的に明らかにする。その結果、光/光変換効率で 29.3%という大幅な改善（低雑音励起方式の 3.2 倍）が実現できることを説明し、本励起方式の着想の妥当性を実証する。本研究において初めて、30%に迫る利得シフト TDFA の効率を得た。さらに利得シフト TDFA の利得平坦動作を行い、光伝送に使用可能な平坦度 $< \pm 1\ \text{dB}$ を達成すると共に、分散量 $600\ \text{ps/nm}$ の分散補償ファイバを段間に挿入すること

が可能であることも明らかにする。

さらに変調速度 10 Gb/s 以上の高速伝送において必要な偏波モード分散特性を明らかにし、利得シフト TDFA が、現時点で十分に先端光伝送システムへ適用可能な性能を有していることを示す。

[第 5 章] 超大容量波長多重伝送への応用

第 3 章、第 4 章で得られた利得シフト TDFA を用い、従来帯域 (C、L バンド) に加え、1.49 μm 帯を用いた 3 波帯波長多重伝送を行う。まず変調速度 10 Gb/s により利得シフト TDFA を用いた 3 波帯伝送を行い、利得シフト TDFA において、システム性能を劣化させる過剰な雑音が無いことを確認する。そして波長帯域幅 100 nm を越える超広帯域での 3 波帯伝送においては、システム性能 (伝送距離や容量) を制限する要因として、従来あまり注目されてこなかった信号帯域間の誘導ラマン散乱が顕在化することを初めて指摘する。この実験を受け、変調速度を 40 Gb/s に引き上げ、波長多重数 273 波、周波数利用効率 0.8 b/s/Hz という超高密度かつ 10.92 Tb/s という超大容量波長多重伝送を試み、それに成功した結果を述べる。

ここで行った実験は、実験室レベルではあるが、将来の実用性システムを強く意識しており、基本的な課題はあらかじめ抽出されて、その解決策も提示できている。利得シフト TDFA は、近未来に想定される伝送容量の拡大要求に対し、即応可能な強力な要素技術であり、その意義は大きいと考える。

[第 6 章] 結論

本研究で得られた主要な結果を総括し、今後の展望を述べる。

本論文の構成と各章の関係を図 1-4 に示す。

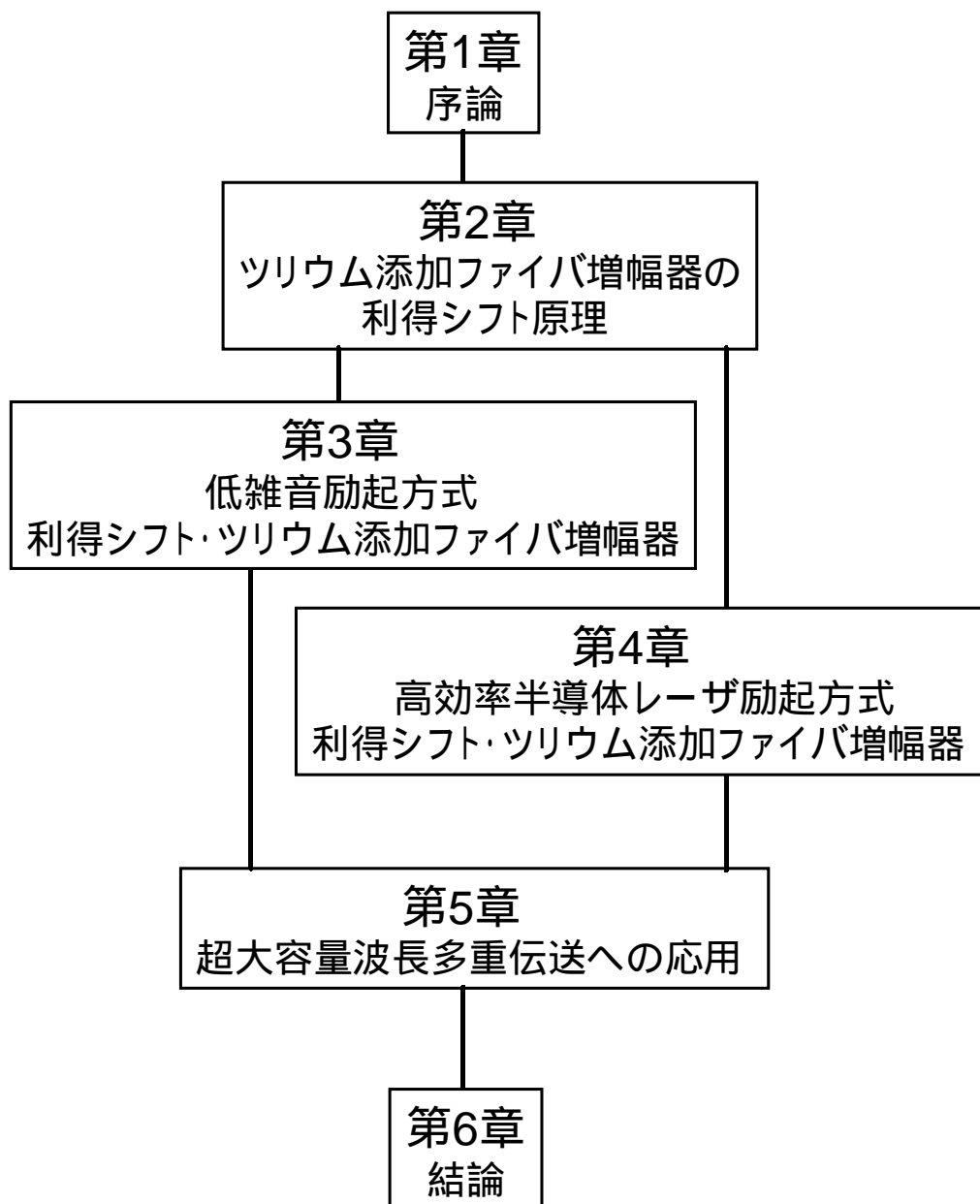


図 1-4 本論文の構成

参考文献

- [1] 羽鳥光俊、青山友紀、小林郁太郎編著、「光通信工学(1)」、コロナ社、第 5 章、p. 136、1998 年.
- [2] 井上信雄、「通信の最新常識」、日本実業出版社、1999 年.
- [3] 吉村寛、「ブロードバンド時代の光ネットワークとフォトニクスデバイス」、光エレクトロニクス技術セミナー基調講演資料、2001 年 12 月.

- [4] 江村克己、「10 Tbit/s を超えた WDM 光伝送の大容量化」, O plus E 誌、第 23 巻第 9 号、pp. 1039-1045、2001 年.
- [5] 日経マーケット・アクセス年鑑、「IT 基本データ 2001 年度版」, p. 33.
- [6] 羽鳥光俊、青山友紀、小林郁太郎編著、「光通信工学 (1)」, コロナ社、第 2 章、1998 年.
- [7] 波平宜敬、「ITU-T の光波長帯域 (バンド) 決定」, オプトロニクス誌、第 12 号、pp 163-167、2000 年.
- [8] T. H. Maiman, “Stimulated optical radiation in ruby,” Nature, vol. 187, no. 4736, pp. 493-494, 1960.
- [9] E. Snitzer, “Proposed fiber cavities for optical masers,” J. Appl. Phys., vol. 32, no. 1, pp. 36-39, 1961.
- [10] C. J. Koester and E. Snitzer, “Amplification in a fiber laser,” Appl. Opt., vol. 3, no. 10, pp. 1182-1186, 1964.
- [11] 須藤昭一編、「エルビウム添加光ファイバ増幅器 ~情報通信ネットワークに革命をもたらすキーデバイス~」, オプトロニクス社、第 1 部第 1 章、第 3 部第 1 章、1999 年.
- [12] 石尾秀樹監修、「光増幅器とその応用」, オーム社、第 5 章、1992 年.
- [13] レーザー研究、光ファイバアンプ特集号、第 25 巻第 2 号、1997 年.
- [14] S. B. Poole, D. N. Payne, and M. E. Fermann, “Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions,” Electron. Lett., vol. 21, no. 17, pp. 737-738, 1985.
- [15] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, and D. N. Payne, “Neodymium-doped silica single-mode fibre lasers,” Electron. Lett., vol. 21, no. 17, pp. 738-740, 1985.
- [16] E. Desurvire, J. R. Simpson, and P. C. Becker, “High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier,” Opt. Lett., vol. 12, no. 11, pp. 888-890, 1987.
- [17] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, “Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μ m with pump at 1.49 μ m and Yb sensitized Er oscillator,” OFC’88, paper PD2, 1988.
- [18] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, “Efficient Er³⁺-doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μ m InGaAsP laser diode,” Appl. Phys. Lett., vol. 54, no. 4, pp. 295-297, 1989.
- [19] K. Hagimoto, K. Iwatsuki, A. Takada, M. Nakazawa, M. Saruwatari, K. Aida, K. Nakagawa, and M. Horiguchi, “A 212 km non-repeated transmission experiment at 1.8 Gb/s using LD pumped Er³⁺-doped fiber amplifiers in an IM/direct-detection repeater system,” OFC’89, postdeadline paper PD15, 1989.

- [20] 中川清司、萩本和男、「超大容量 FA-10G 光伝送方式の開発」, NTT R&D、第 44 巻第 3 号、pp. 241-246, 1995 年.
- [21] H. Ono, M. Yamada, and Y. Ohishi, “Gain-flattened Er^{3+} -doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60- μm wavelength region,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 5, pp. 596-598, 1997.
- [22] J. F. Massicott, J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie, and S. P. Craig-Ryan, “High gain, broadband, 1.6 μm Er^{3+} doped silica fibre amplifier,” Electron. Lett., vol. 26, no. 20, pp. 1645-1646, 1990.
- [23] アグラワール、「非線形ファイバー光学」, 吉岡書店、第 10 章、1997 年.
- [24] T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasawara, R. Ohhira, and T. Ono, “6.4 Tb/s (160 \times 40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency,” ECOC2000, postdeadline paper PDP1.1, 2000.
- [25] S. Bigo, A. Bertaina, Y. Frignac, S. Borne, L. Lorcy, D. Harnoir, D. Bayart, J.-P. Hamaide, W. Idler, E. Lach, B. Franz, G. Veith, P. Sillard, L. Fleury, P. Guénot, and P. Nouchi, “5.12 Tbit/s (128 \times 40 Gbit/s WDM) transmission over 3 \times 100 km of TeraLightTM fibre,” ECOC2000, postdeadline paper PDP1.2, 2000.
- [26] 田崎三郎、美咲隆吉他、「通信工学」, 朝倉書店、第 7 章、p. 120、1983 年.
- [27] 北山研一、「総論 - 21 世紀ネットワークの創造と限らないインパクト - 」, 電子通信情報学会誌、第 85 巻第 5 号、pp. 298-305、2002 年.
- [28] J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, S. Aizawa, T. Sakamoto, and K. Oguchi, “Trinal-wavelength-band WDM transmission over dispersion-shifted fibre,” Electron. Lett., vol. 35, no. 4, pp. 321-322, 1999.
- [29] Y. Sun, A. K. Srivastava, S. Banerjee, J. W. Sulhoff, R. Pan, K. Kantor, R. M. Jopson, and A. R. Chraplyvy, “Error-free transmission of 32 \times 2.5 Gb/s DWDM channels over 125 km of AllWaveTM fiber using cascaded in-line semiconductor optical amplifiers,” in *Proc. Topical meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA'99)*, postdeadline paper PDP6, 1999.
- [30] J. Bromage, J.-C. Bouteiller, H. J. Thiele, K. Brar, J. H. Park, C. Headley, L. E. Nelson, Y. Qian, J. DeMarco, S. Stulz, L. Leng, B. Zhu, and B. J. Eggleton, “S-band all-Raman amplifiers for 40 \times 10 Gb/s transmission over 6 \times 100 km of non-zero dispersion fiber,” OFC2001, postdeadline paper PD4, 2001.

第2章 ツリウム添加ファイバ増幅器の利得シフト原理

2.1 まえがき

本章では、まず希土類イオンの分光学的特性と希土類添加ファイバ増幅器の特徴をエルビウム添加ファイバ増幅器 (EDFA) を例に取り、詳細に説明していく。その後、ツリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) において利得シフトを実現する条件が、EDFA における利得シフトと本質的に同値であることを論じる。その上で、利得シフト TDFA を実現する 2 種類の新励起方式を詳しく説明する。最後に新規励起方式の理論モデルを構築する。

2.2 利得シフトの概念

2.2.1 固体中の希土類イオンの分光学的特性と増幅モデル

固体結晶 (ガラスなどの非晶質を含み、「ホスト」という) に添加された希土類元素は、一般的に 3 価の陽イオン (2 価または 4 価の場合もある) の形を取り安定に存在する。希土類イオンの発光・吸収遷移は、その希土類イオンの不完全 4f 軌道の電子遷移に基づくものであり、その発光・吸収のスペクトルはホストである固体結晶の材料組成には余り依存せず、希土類イオン自身の持つエネルギー準位構造により決定されている[1-3]。これは 4f 軌道の外側に 5s、5p 軌道の電子が存在し、閉殻構造を取っていること、4f 軌道の広がりが 5s、5p 軌道の半分程度と小さいことから、静電遮蔽によりホスト構成原子からの電界 (結晶場) の影響を受けにくい状況にあるためである。さらに 4f 電子間の遷移は同一電子配置内の遷移であるため、電気双極子遷移はパリティにより原則的に禁止されているが、対称性を持たない結晶やガラスなどの非晶質を構成する原子からの結晶場や、格子振動により、禁制が一部解け、極めて発光寿命の長い電気双極子遷移が生じることが知られている。

最近、半導体レーザ・デバイスと同様に、量子力学的計算に基づいて希土類イオンの発光スペクトルを計算あるいは制御する試みも行われている[4-7]。しかしながら、任意の発光波長を有する希土類デバイスを実現するには至っていない。既存のホストと所望の発光遷移を有する希土類イオンの組み合わせを選択し、それに適した励起手法を適用することにより、所望のレーザ発振・光増幅を得ることが通常行われている手法である。

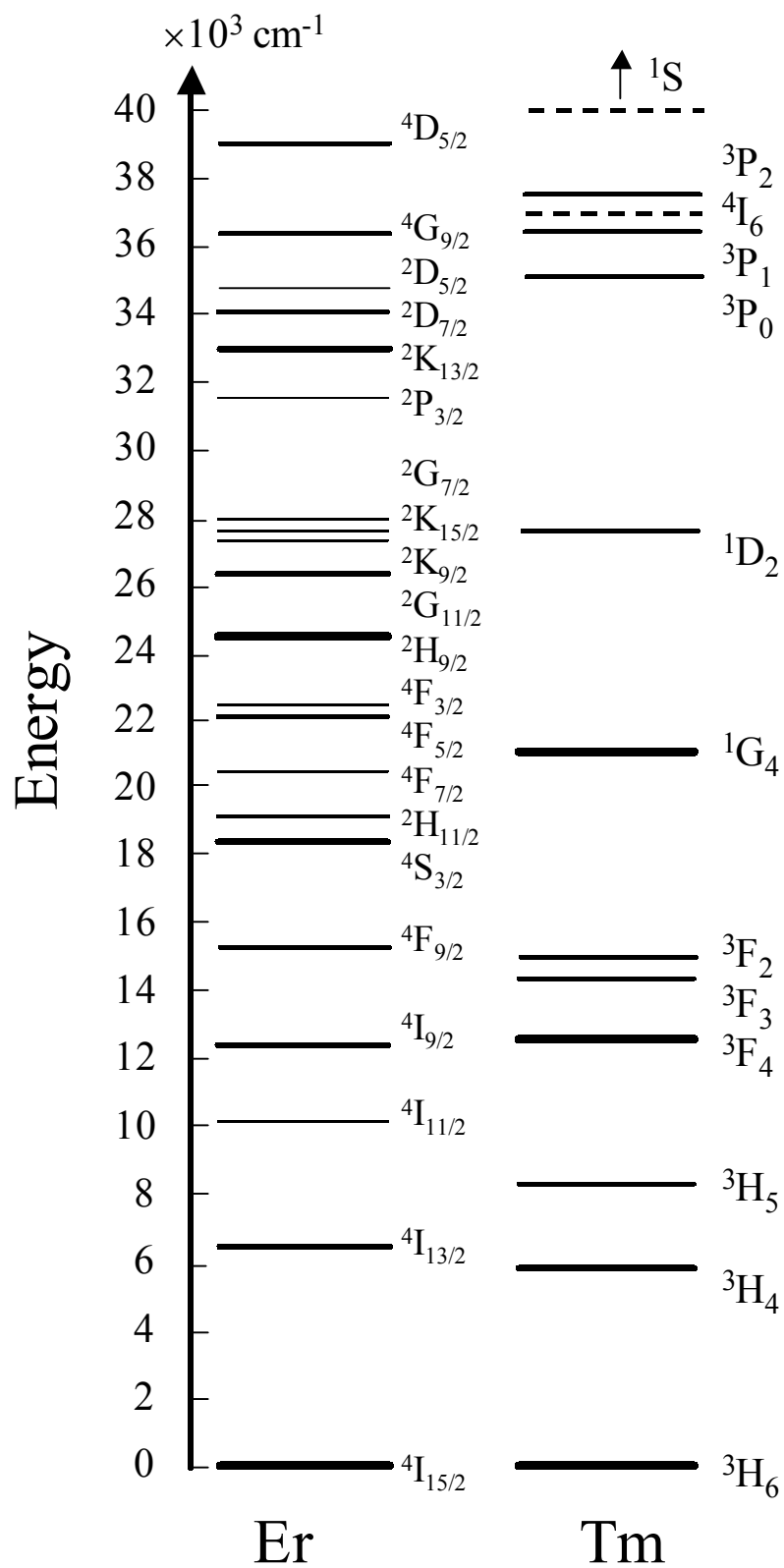


図 2-1 Er イオンおよび Tm イオンのエネルギー準位構造
エネルギーは分光学の慣用に従い波数 cm^{-1} で表した。

図 2-1 に例として Er (エルビウム、原子番号 68) イオンと Tm (ツリウム、原子番号 69) イオンのエネルギー準位構造を示す。エネルギーの単位は分光学での慣用に従い、波数 cm^{-1} で表記した。Er イオンでは、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の光増幅に $^4\text{I}_{13/2}$ 準位から $^4\text{I}_{15/2}$ 準位 (基底準位) へと遷移する発光が用いられる。ここでエネルギー準位の表現方法として、ラッセル・サンダース結合による表記を採用している。すなわち各準位には、 $^{2S+1}L_J$ という記号が付けられ、中央の記号 L は全軌道角運動量量子数、 S は全スピン角運動量量子数、 J は全角運動量量子数を表す。固体中の希土類イオンのエネルギー準位は、(1) 原子核が形成する中心対称な電場および 4f 殻電子間相互作用 (静電相互作用) (2) スピン軌道相互作用 (磁気相互作用) (3) 4f 殻電子と結晶場による相互作用 (シュタルク効果) の 3 段階を経て、当初は縮退していたものが、 $2J+1$ 個のエネルギー準位に分裂していくことで説明される。その様子を模式的に示したのが図 2-2 である。各 $^{2S+1}L_J$ 準位を多重項といい、さらに細分化された準位をシュタルク準位という。各シュタルク準位の組み合わせにより多数の発光・吸収が同時に起こっている。そして実験で観測されるのはこれらの遷移スペクトルの重ね合わせである。また各多重項内ではイオン数分布は一般的にボルツマン分布に従っている。これはシュタルク準位の間隔は、常温では $20 \sim 80\ \text{cm}^{-1}$ であるのに対し、各シュタルク準位は、 $40 \sim 100\ \text{cm}^{-1}$ 程度の広がりを持っているためほぼ完全に重なり合っているためである。また重要な特徴として、エルビウムの発光スペクトルの広がり、常温では概ね「均一広がり」であることである。均一広がりとは、発光スペクトル広がり、自然寿命等、にのみ起因しており、本質的に全ての Er イオンが同じ広がり幅を有している場合を指す[8, 9]。

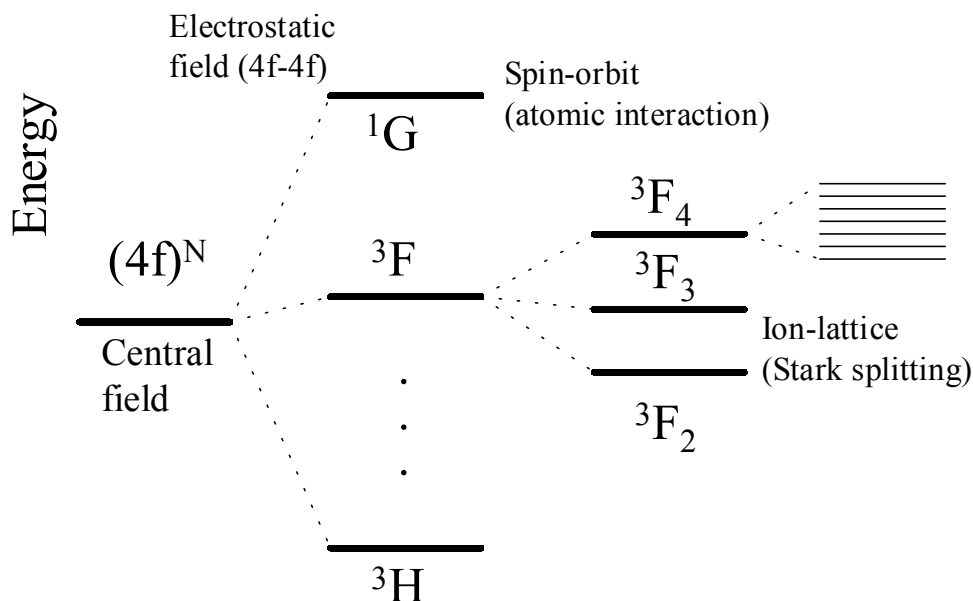


図 2-2 希土類イオンのエネルギー準位の縮退と分裂

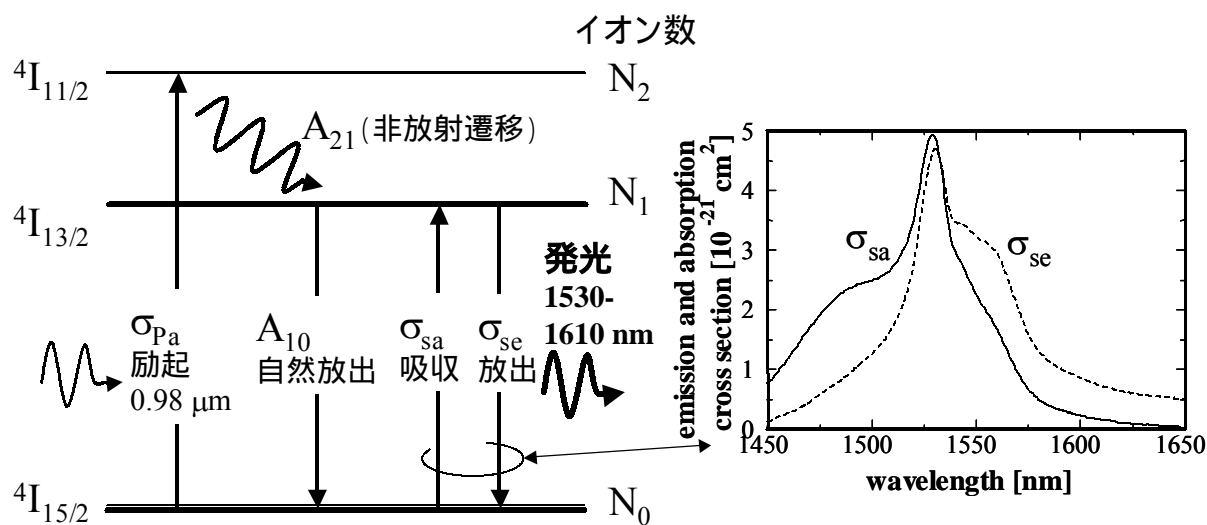


図 2-3 Er イオンのエネルギー準位（基底準位を含む下位より 3 個）と誘導遷移

希土類イオンの発光・吸収を表す指標には、時間の次元を持つ「蛍光寿命」と面積の次元を有する「遷移断面積」をよく用いる。蛍光寿命は原子系が発光で緩和する際の時定数であり、2 準位系におけるアインシュタインの A 係数の逆数に相当する。一般的には長い方がエネルギーの蓄積効率と発光効率が高い。一方、遷移断面積はアインシュタインの B 係数に相当し、光束と原子系が相互作用する強さを表す。

ところで、石英などのガラスでは格子振動の周波数が高く、最大フォノンエネルギー $\hbar\omega$ は 1100 cm^{-1} （光学モード）である[10]。このため多重項間のエネルギー間隔が狭いとき、例えば 3000 cm^{-1} 程度では、このエネルギー間隔を発光遷移するのでは無く、光学フォノンを 3 個放出し格子振動にエネルギーを渡しなが、非放射遷移で緩和する確率の方がはるかに高い。 $4I_{11/2}$ と $4I_{13/2}$ 準位間の遷移（エネルギー準位差およそ 3650 cm^{-1} =波長 $2.7 \mu\text{m}$ [11]）が、石英において不活性であるのはこのためである。

次に Er イオンを例に取り、希土類イオンにおける光増幅現象を、数式を用いて記述する。一般に希土類イオンを光励起することで反転分布を形成することが出来る。図 2-3 に $1.55 \mu\text{m}$ 帯光増幅に関与するエネルギー準位（基底準位と 2 つの励起準位）と誘導遷移スペクトルを示す。この $1.55 \mu\text{m}$ 遷移は、基底準位とレーザ下準位が一致する 3 準位系に分類される。波長 980 nm ($4I_{15/2} \rightarrow 4I_{11/2}$) または 1480 nm ($4I_{15/2} \rightarrow 4I_{13/2}$ 、この遷移は図示していない) の半導体レーザ励起光を Er イオンに照射することで、 $4I_{13/2}$ 準位（レーザ上準位）に電子が存在する Er イオン数が、 $4I_{15/2}$ 準位（レーザ下準位）に電子が存在する Er イオン数を上回り、実効的な利得が形成できる。バルクガラスではなく、シングルモードファイバのコアに Er を添加し、ファイバ増幅器としてデバイスを作製する。これは第 1 章 1.1 節にも述べたように

ファイバ型デバイスとすることで、

- (1) 高動作効率：数ミクロン直径という微小コア領域に、励起光と信号光を閉じ込めることで光強度を高め、Er イオンとの相互作用を増強し、増幅動作を高効率化する。またファイバの長尺化により、光波と Er イオンの相互作用長を大きく取ることが出来る。
- (2) システムへの親和性：ファイバ型のため、既存の光ファイバ通信システムへ接続しやすい。

という大きな利点があるためである。

蛍光寿命と遷移断面積（誘導放出断面積と吸収断面積）は、Er イオンが添加されたファイバ増幅器中での光波の挙動を表す記述式に、以下のように用いられる[12]。(2-1)～(2-3)式は各準位 i に電子が存在する Er イオン数密度 N_i （以降、単にイオン数密度と呼ぶ）の時間変化（レート）を表している。(2-4)式は総イオン数保存則、(2-5)～(2-7)式は信号光、励起光、増幅自然放出光（Amplified spontaneous emission; ASE）の伝搬を表している。(2-8)、(2-9)式は遷移強度を遷移断面積で表したものである。このような式で表されるものを「レート方程式近似」といい、レーザ光波と原子系の位相とコヒーレンスを無視しているが[13]、ファイバ増幅器の解析には十分である。

$$\frac{dN_0}{dt} = (-W_P - W_{sa})N_0 + (A_{10} + W_{se})N_1 \quad (2-1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = W_{sa}N_0 - (A_{10} + W_{se})N_1 + A_{21}N_2 \quad (2-2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_P N_0 - A_{21}N_2 \quad (2-3)$$

$$\sum_i N_i = N_t \quad (2-4)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (\sigma_{se}(\lambda)N_1 - \sigma_{sa}(\lambda)N_0)P_s \quad (2-5)$$

$$\frac{dP_P^\pm}{dz} = \mp \sigma_{Pa} N_0 P_P^\pm \quad (2-6)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm}{dz} = \pm (\sigma_{se}(\lambda)N_1 - \sigma_{sa}(\lambda)N_0)P_{ASE}^\pm \pm 2h\nu\Delta\nu\sigma_{se}(\lambda)N_1 \quad (2-7)$$

$$W_{sa,se} = \frac{\sigma_{sa,se}P_s}{h\nu_s A_{eff}} \quad (2-8)$$

$$W_P = \frac{\sigma_{Pa}(P_P^+ + P_P^-)}{h\nu_p A_{eff}} \quad (2-9)$$

$$G(\lambda) = \exp \left[\int_0^L [\sigma_{se}(\lambda)N_1(z) - \sigma_{sa}(\lambda)N_0(z)]dz \right] = \frac{P_s(L)}{P_s(0)} \quad (2-10)$$

$$NF(\lambda) = \frac{1}{G(\lambda)} + \frac{P_{ASE}^+(\lambda)}{h\nu\Delta\nu G(\lambda)} = \frac{1}{G(\lambda)} + 2n_{sp} \frac{G(\lambda)-1}{G(\lambda)} \quad (2-11)$$

ここで添え字 s , P , ASE はそれぞれ信号光、励起光、ASE 光を表し、 e , a は誘導放出、吸収を示す。また W_P : 励起レート、 W_{se} , W_{sa} : 信号帯域の誘導放出および吸収レート、 t : 時間、 z : ファイバ長手方向の位置、 L : ファイバ長、 λ : 波長、 σ_{se} , σ_{sa} : 誘導放出断面積、吸収断面積、 P_s , P_P , P_{ASE} : 信号光パワー、励起光パワー、ASE 光パワー、 h : プランク定数、 ν : 信号 (または ASE) 周波数、 $\Delta\nu$: ASE 光バンド幅、 N_t : Er イオン添加濃度、 $A_{ij} = f_{ij}/\tau_i$: i 準位から j への自然放出遷移レート (または非放射緩和レート) f_{ij} : i 準位から j への分岐比、 τ_i : i 準位の蛍光寿命、 A_{eff} : 実効コア断面積、 $n_{sp} = N_1/(N_1 - N_0)$: 自然放出パラメータである。また正負号はそれぞれ順方向 (+ z 方向) 逆方向 (- z) に伝搬する光波を示す。

なお石英系 EDFA においては非放射遷移レート A_{21} は極めて大きく (6.4×10^4 1/s) $^4I_{11/2}$ 準位へ励起された Er イオンは、高速に $^4I_{13/2}$ 準位へと遷移する。このため実質的に $N_2 \approx 0$ になり、(2-4)式から $N_0 + N_1 = N_t$ になることに注意されたい。また(2-5)式において信号光の誘導放出にともなう利得、吸収にともなう減衰が記述され、(2-8)式においてそれらの遷移強度が表されることが重要である。

また(2-10)、(2-11)式でファイバ増幅器の性能指標である利得 $G(\lambda)$ 、雑音指数 $NF(\lambda)$ (noise figure; NF)を定義している。利得はファイバ増幅器の入力信号と増幅された信号の光パワーの比で定義される。通常は対数を取り、dB 単位で表す。(2-10)式中辺は、(2-5)式右辺の信号光パワーの係数をファイバ長手方向に積分したものに相当する。実験的には右辺より算出する。

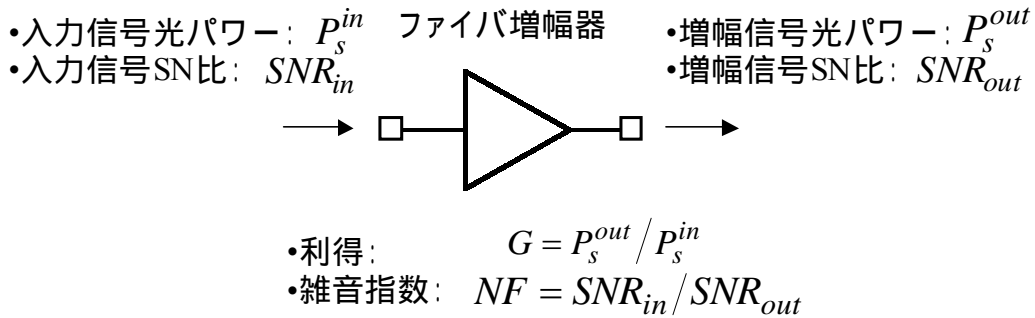


図 2-4 ファイバ増幅器の利得、雑音指数の定義

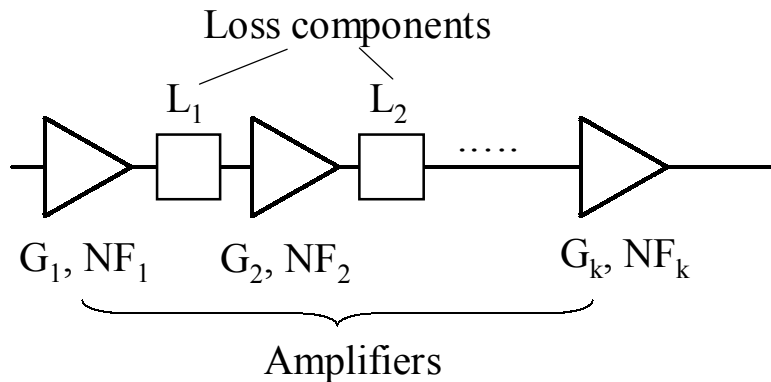


図 2-5 ファイバ増幅器の縦列接続

また雑音指数とは、ファイバ増幅器の入出力端に理想的な光電変換受信器を挿入したときの、「電気信号での入力信号対雑音比 SNR_{in} (signal-to-noise ratio) と出力信号対雑音比 SNR_{out} の比」で定義される (図 2-4 参照[14])。つまり

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (2-12)$$

が雑音指数の定義である。一般に、光増幅器において加算される雑音により、出力 SN 比 SNR_{out} は入力 SN 比 SNR_{in} より低くなるため、 $NF > 0$ dB が常に成り立つ。一方、(2-11)式は光信号での測定であり、利得が十分高いときには(2-12)式の電気信号の測定と一致することが、詳細な理論的検討から示されている。(2-11)式の中辺第 1 項は信号ショット雑音、第 2 項は信号-ASE 間ビート雑音であり、利得 $G(\lambda) > 10$ dB であれば右边第 1 項は無視できる。ここで雑音指数の重要な特徴は以下の点である[14]。

- (1) 最小値 3 dB : 光増幅器の雑音指数の最小値は 3 dB である (コヒーレント増幅器[15]を除く)。これを「量子限界」あるいは「ビート雑音限界」という。
- (2) 反転分布との関係 : (2-11)式右边から、雑音指数は自然放出パラメータ $n_{sp} = N_1 / (N_1 - N_0)$ と関係付けられ、自然放出パラメータが小さいほど、すなわち反転分布が強く形成されているほど (下準位数 $N_0 \approx 0$) 雑音指数は小さくなる。
- (3) 入力損失 : 増幅ファイバまでの損失は雑音指数に和の形で寄与する。すなわち損失 L_0 dB が増幅ファイバ前に存在する場合、全体の雑音指数は、(増幅ファイバでの雑音指数 NF_1) + L_0 dB となる。
- (4) 縦列則 : 図 2-5 のように増幅段と損失段が k 段縦列接続されている場合 (例えば、「ファイバ増幅器と伝送路ファイバ」や、「ファイバ増幅器と受動光部品」) 以下の(2-13)

式で雑音指数が計算できる。下式は第3章、第4章で述べる利得平坦化を施した利得シフト TDFA などの特性把握に用いられる。

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2}{G_1 L_1} + \frac{NF_3}{G_1 L_1 G_2 L_2} + \dots + \frac{NF_k}{\prod_{i=1}^{k-1} G_i L_i} \quad (2-13)$$

2.2.2 ファイバ増幅器における利得シフトの概念

- エルビウム添加ファイバ増幅器の場合

均一広がり媒質においては、単位長さあたりの利得係数 $g(\lambda)$ は、以下(2-14)式のように書ける[2, 3, 9, 12]。(2-10)式の空間積分はイオン分布のみに適用できること、すなわち誘導放出・吸収断面積は位置 z に依存しないことを用いた。これは均一広がりの方の基本的前提である。また平均反転分布率 ΔN を(2-15)式で、局所反転分布率 $\Delta N(z)$ を(2-17)式で定義する。

$$g(\lambda) = \frac{1}{L} \int_0^L [\sigma_{se}(\lambda) N_1(z) - \sigma_{sa}(\lambda) N_0(z)] dz \quad (2-14)$$

$$\begin{aligned} &= \sigma_{se}(\lambda) \overline{N_1} - \sigma_{sa}(\lambda) \overline{N_0} = [\sigma_{se}(\lambda) \Delta N - \sigma_{sa}(\lambda) (1 - \Delta N)] N_t \\ \Delta N &= \overline{N_1} / (\overline{N_0} + \overline{N_1}) = \overline{N_1} / N_t \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\text{ただし } \overline{N_i} = \int_0^L N_i(z) dz / L \quad (2-16)$$

$$\Delta N(z) = N_1(z) / [N_0(z) + N_1(z)] = N_1(z) / N_t \quad (2-17)$$

(2-14)式から単位長さあたりの利得係数 $g(\lambda)$ は、遷移断面積とイオン添加濃度 N_t および平均反転分布率 ΔN のみの関数であることが分かる。例えば、

- (a) 上準位に全く励起されていない場合： $\overline{N_1} = 0$ であるので、 $g(\lambda) = -\overline{N_0} \sigma_{sa}(\lambda)$ となる。正の利得は得られず、実効的に吸収断面積と同じスペクトルを呈する。
- (b) 全ての Er イオンが上準位に励起された場合： $g(\lambda) = \overline{N_1} \sigma_{se}(\lambda)$ となる。つまり利得スペクトルは誘導放出断面積と同一形状となり、動作条件によらない。

その中間の反転分布状態の場合も考えられ、図 2-6 に示すような利得スペクトルとなる。ここで、平均反転分布率 $\Delta N > 0.7$ であると、波長 1.53 ~ 1.57 μm をカバーする従来型 C バンド EDFA が実現できる。一方、 $\Delta N = 0.4$ では、波長 1.58 ~ 1.61 μm において、利得最大値は

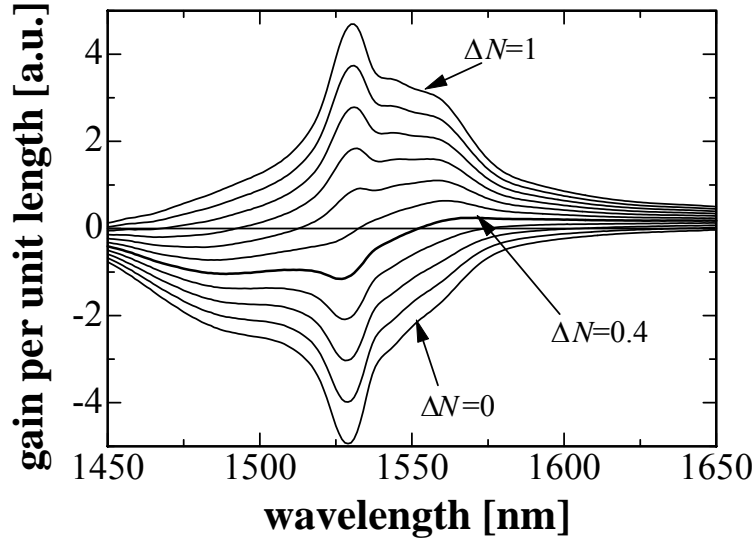


図 2-6 EDFA の利得スペクトル（平均反転分布率 $\Delta N = 0 \sim 1$ 、0.1 刻み）

小さいものの平坦な利得スペクトルが得られる。この状態がいわゆる利得シフト型の L バンド EDFA と呼ばれているものである[16-20]。従来型 C バンド EDFA との本質的な差異はファイバ全域における平均反転分布率の値であり、L バンド EDFA は EDFA の動作条件の一つと言える。

ただし L バンド EDFA での利得係数は、C バンドの 1/10 程度と非常に低い。このため、L バンド EDFA の動作効率を高めるため、同一濃度の場合は C バンドよりも 10 倍程度（およそ 100 ~ 300 m）にファイバ長を伸長すること、または高濃度化が施されている[16]。つまりファイバの濃度条長積（Er 添加濃度とファイバ長の積）を、C バンドより 10 倍程度大きくすることで、C バンドに匹敵する高利得 L バンド動作を実現する。

以上から、平均反転分布率を低減することにより EDFA の利得シフトが達成できることが示された。実は、この現象は Er に限らず、本質的に任意の希土類イオン（遷移金属イオンも）で発現する。その物理的起源は以下のように説明できる。すなわち McCumber によると、任意の 2 準位間の誘導放出断面積と吸収断面積の間には(2-18a)式のような関係がある[21]。(2-18a)式を波長で表したものが(2-18b)式である。

$$\sigma_{se}(\nu_s) = \sigma_{sa}(\nu_s) \exp[(\varepsilon - h\nu_s)/kT] \quad (2-18a)$$

$$\sigma_{se}(\lambda_s) = \sigma_{sa}(\lambda_s) \exp[(\varepsilon - hc/\lambda_s)/kT] \quad (2-18b)$$

ただし、 ν_s : 信号周波数、 λ_s : 信号波長、 ε : 励起エネルギー（この 2 準位の下準位から

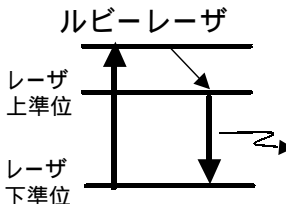
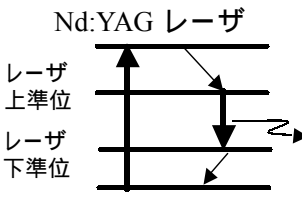
上準位へ励起するのに必要な自由エネルギー χ 、 k : ボルツマン定数、 T : 絶対温度である。この式が成立する前提は「各準位内で十分に速い熱的緩和が生じていること」のみである。固体内での希土類イオンは、1 モル ($\sim 10^{23}$ 個) ほどの原子に囲まれ、熱的緩和はピコ秒程度である。蛍光寿命 (ミリ秒) に比べ、十分速いことが保証される。

(2-18a) または (2-18b) 式から、吸収断面積のピーク波長あるいはスペクトル上の重心位置は、常に誘導放出断面積よりも短波側にあることが分かる。このことから反転分布が低いとき、つまり (2-14) 式で、第 2 項が支配的な場合、常に短波側の方が長波側よりも大きな吸収を受ける。言い換えると、低い反転分布では長波側が短波側よりも常に先に正の利得を呈する。このことが利得シフトの本質的メカニズムである。今までは EDFA のみで利得シフトが実現されていた。本研究において 2.3.3 節に述べる手法を用い、世界で初めて TDFA の利得シフトを実現した。

なお L バンド EDFA において、反転分布率 ΔN を 0.4 に固定するために当初提案されたのは、励起波長における誘導放出を強め、反転分布率を低下させる方法である。英ブリティッシュ・テレコム の Massicott 等 [17] は、励起波長をあえて誘導放出スペクトルのピーク辺り ($1.55 \mu\text{m}$) とすることで、ファイバ全域に渡り反転分布率を 0.4 に固定することに成功した。その後、BT の発展形態として、NTT [18]、関西電力 [19]、古河電工 [20] が、通常の励起波長 ($0.98 \mu\text{m}$ や $1.48 \mu\text{m}$) 励起においても Er ファイバの濃度条長積の設定により、反転分布率 0.4 を達成できることを報告した。この方法では、極めて濃度条長積の高い Er ファイバ ($325 \text{ kppm}\cdot\text{m}$) を励起することにより、ファイバの前半部分で $1.55 \mu\text{m}$ 帯 ASE 光を成長させ、それを後半部分の励起光とすることで、 $1.55 \mu\text{m}$ 励起と同等の利得スペクトルを得る手法である。通常の励起光源と Er ファイバの濃度や条長の設定だけで、L バンド EDFA を実現できるため、現在では本方式が主流である。

本節の最後に、3 準位系増幅器と 4 準位系増幅器の動作の違いを表 2-1 に示す [2, 22]。レーザ発振器や増幅器を、エネルギー準位構造の違いから 3 準位系あるいは 4 準位系に分類することが出来る。すなわち、レーザ下準位が基底準位と一致するものを 3 準位系、一致しないものを 4 準位系と呼ぶ。一般に 4 準位系ではレーザ下準位の寿命が十分短く (例えば Nd:YAG の場合、数 nsec 以下)、下準位イオン数が蓄積しない場合を指すことが多い。利得スペクトル形状が 4 準位系では固定であるのに対し、3 準位系では可変であること、利得が最大となるファイバの最適長が存在することなどの違いがある。さらに、4 準位系で下準位寿命が比較的長い場合、エネルギー準位構造から見ると 4 準位系に分類されるが、増幅器動作は 3 準位に漸近する。この違いが、以降に述べるトリウム添加ファイバ増幅器の利得シフト動作を理解する鍵となる。

表 2-1 増幅器動作の観点から見た 3 準位系と 4 準位系の違い

	3 準位動作	4 準位動作 (下準位寿命 ≈ 0)
レーザ下準位数	相当数	零
反転分布率	1 未満	1
利得閾値	あり	なし
飽和出力	励起パワーに比例	一定
利得スペクトル形状	反転分布率に依存	一定 (誘導放出断面積と同形状)
最適ファイバ長	あり	なし
代表例	EDFA	Nd 添加ファイバ増幅器
エネルギー準位構造	<p>ルビーレーザ</p> 	<p>Nd:YAG レーザ</p> 

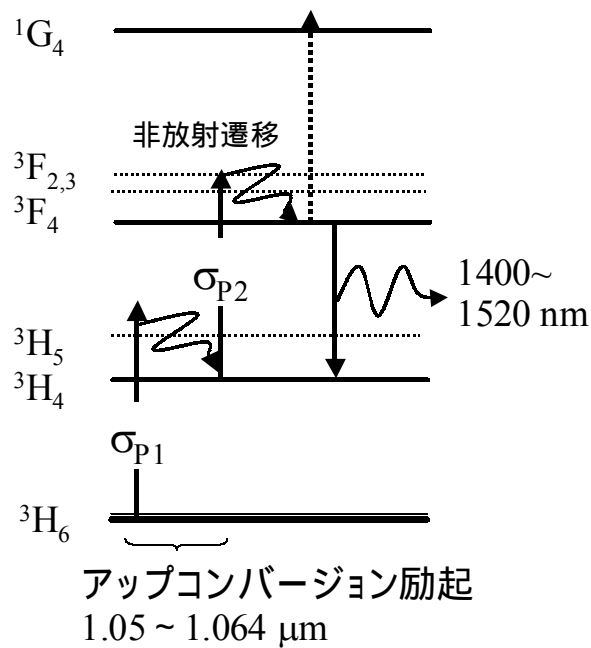


図 2-7 Tm イオンのエネルギー準位とアップコンバージョン励起方式

2.3 ツリウム添加ファイバ増幅器における利得シフト

2.3.1 ツリウムイオンの分光学的特性

図 2-7 にツリウムイオン (Tm^{3+}) のエネルギー準位構造 (基底準位を含む下位より 7 個の準位) を示す。Tm イオンの発光が初めて観測されたのは、古く 1967 年の米国海軍研究所 Gandy 等による報告まで遡る[23]。

ツリウムは、フッ化物ガラス [代表例 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ 系ガラス (ZBLAN と略す)] に添加されることが多い。このガラスでは、最大フォノンエネルギーは $\hbar\omega=500\text{ cm}^{-1}$ であり、石英ガラスに比べ半分以下になる[10]。このため、エネルギー間隔が狭いエネルギー準位間でも発光遷移が観測される。本研究におけるツリウム添加ファイバ増幅器は、全て NTT エレクトロニクス社製 ZBLAN 系フッ化物ガラスを用いている。フッ化物ガラス中のツリウムイオンは、多数のエネルギー準位が蛍光寿命の長い準安定状態になり、エネルギー値 $\sim 20000\text{ cm}^{-1}$ 以上の高位のエネルギー準位を励起すると、可視から赤外にわたる非常に多彩な発光遷移が観測されることが知られている[24]。これらを利用したファイバレーザや増幅器の研究も行われてきた。紫外 360 nm ($^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_6$)、緑青色 480 nm 、($^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$)、 $1.9\text{ }\mu\text{m}$ ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$)、 $2.3\text{ }\mu\text{m}$ ($^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$) など、医療 (紫外、中赤外)、光ディスク用 (緑青色)、計測用 (中赤外) に応用可能なレーザ・デバイスとして注目されてきた。なおフッ化物ガラス以外にも、低フォノンエネルギーガラスとしてカルコゲン系ガラスが知られているが、ファイバ化が困難かつ背景損失が大きいう問題を抱えているおり、市販品として入手が困難であること等から本研究では用いなかった。

本研究では $^3\text{F}_4$ 準位 (レーザ上準位) と $^3\text{H}_4$ 準位 (レーザ下準位) の間の誘導放出遷移について注目する。この遷移は 1460 nm をピーク波長とし、 $1400\sim 1520\text{ nm}$ に広がる広帯域な蛍光を発する[25]。希土類イオンで、本帯域の発光を呈するものは他には無い[26]。通常のツリウム添加ファイバ・デバイスは、この蛍光特性をそのまま利用した $1.47\text{ }\mu\text{m}$ 帯の増幅器あるいはレーザ発振器として利用されてきた。2.3.2 節にて従来からのツリウム添加ファイバ増幅器の特徴と課題を述べる。なお Er イオンと同様、ツリウムイオンも均一広がりであると考えられ[27]、2.2 節の議論が適用できる。また $^3\text{F}_4$ 準位の直下に、エネルギー間隔 4390 cm^{-1} で $^3\text{H}_5$ 準位が位置しているので[25]、フォノンエネルギーの大きな石英ファイバでは、 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_5$ を非放射で遷移しやすい。このため石英ファイバでは $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 遷移は基本的に不活性である。

EDFA での(2-14)式を TDFA の場合書き直すことで (上準位数を $^3\text{F}_4$ イオン数、下準位数を $^3\text{H}_4$ イオン数とする) 得られた TDFA 利得スペクトルの平均反転分布率依存性を図 2-8 に示す。ただし 2.3.4 節で述べる $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 誘導放出断面積、 $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 吸収断面積などを用い

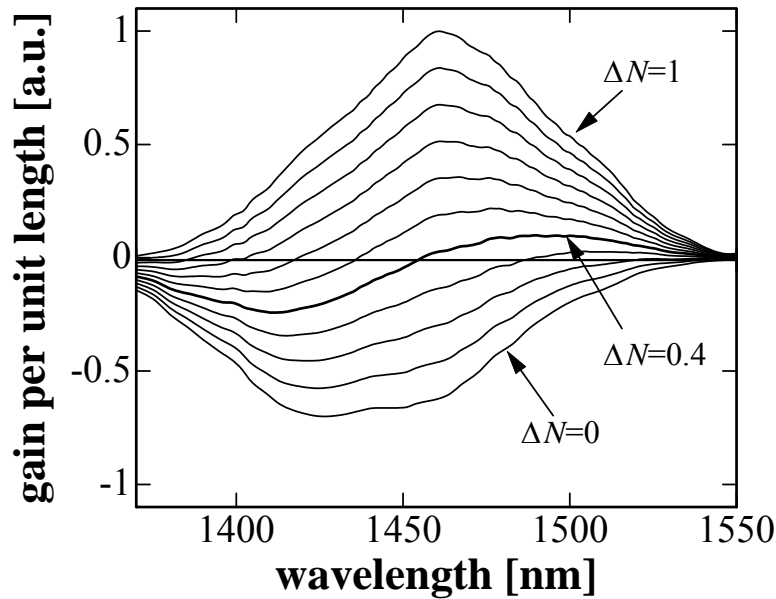


図 2-8 TDEFA の利得スペクトル（平均反転分布率 $\Delta N=0 \sim 1$ 、0.1 刻み）

ている。最上位の曲線が反転分布率 1 に相当し、波長 1460 nm にピークを有する誘導放出断面積（蛍光スペクトル）と合致する。最下位の曲線が反転分布率 0 で吸収断面積に相当する。波長 1490 nm にピークを有する利得シフト動作は、EDFA 同様、原理的に反転分布率 0.4 付近において得られることが分かる。

2.3.2 従来のトリウム添加ファイバ増幅器と課題

従来から $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ 遷移を用いたトリウム添加ファイバ増幅器（TDEFA）の開発が、主に NTT、英国 BT、そして米国海軍研究所により進められてきた。この $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ 遷移は、下準位が基底準位と一致しない 4 準位系に分類されるが、同時に上準位寿命（1.4 msec）が下準位寿命（9 msec）より短い、いわゆる「自己終端系」を成している。この場合 3F_4 準位ないし、それより上方のエネルギー準位を直接励起する励起方式（例えば 0.8 μm 光による 3F_4 励起）を用いると、下準位にトリウムイオンが蓄積してしまい、持続的に反転分布を形成すること難しく、ひいては効率よい増幅動作が実現できないことが指摘されてきた[25, 28]。従って、下準位のイオン数蓄積を極力減らすことが従来までの高効率化の手法であった。

下準位密度を減少させるため、これまでカスケード法[28-30]、共添加法[31, 32]、アップコンバージョン（周波数上昇変換）励起法が提案されてきた[25, 33-37]。表 2-2 にこれまでの TDEFA およびレーザ発振器の報告例をまとめた。カスケード法は、 $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ 遷移と $^3H_4 \rightarrow ^3H_6$ 発光遷移（1.8~1.9 μm ）を同時に起こす手法である。共添加法では、 Tm^{3+} の 3H_4 準位が

表 2-2 従来の 1.47 μm 帯ツリウム添加ファイバレーザおよび増幅器

方式	レーザ/増幅器	励起波長 (μm)	濃度 (ppm)	ファイバ長 (m)	効率 (%)	利得帯域 (nm)	最大利得 (dB)	雑音指数 (dB)	入力信号 (dBm)	出力パワー (dBm)	機関	文献
U	A	1.064	2000	10	12.5	1440-1510	23	3.5	-40	13	NTT	[25]
U	A	1.064	1200	12	34	1450-1485	18	3.2	-35	17	BT	[35]
U	A	1.047	2000	23	2.5	1451-1485	22	6	-10	12	NTT	[36]
U	A	1.047	2000	20	12	1453-1483	24	6	-7	19	NTT	[37]
Co	A	0.79	500	20	-	1450-1500	18	5.6	-40	-	NTT	[31]
C	L	0.676	1250	1.5	1.6	1460-1510	-	-	-	0.2 mW	CNET	[28]
C	L	0.79	-	-	43	1475	-	-	-	130 mW	BT	[29]
C	L	0.79	1000	-	20	1460	-	-	-	20 mW	NRL	[30]
U	L	1.064	2000	9	29	1470	-	-	-	1000 mW	NTT	[33]
U	L	1.064	1000	11	58	1475	-	-	-	120 mW	BT	[34]
Co	L	0.775	1000	0.8	16	1481	-	-	-	55 mW	BT	[32]

注) C : カスケード法、U : アップコンバージョン励起法、Co : 共添加法を指す。

L : レーザ、A : 増幅器である。効率はレーザの場合、スロープ効率を指す。

CNET : Centre National d'Etudes des Telecommunications

NRL : Naval Research Laboratory

ら共添加した Tb^{3+} や Ho^{3+} へエネルギー移乗を起し、 $^3\text{H}_4$ 密度を減少させる手法である。

この中で、アップコンバージョン励起により最も優れた増幅器特性が実現できることが示された。この方式では以下の多段プロセスを踏む。 Tm イオンは、励起光子 (波長 1.05~1.064 μm) を吸収して基底準位 $^3\text{H}_6$ から $^3\text{H}_5$ 準位へと励起される。励起された Tm イオンは光学フォノンによる格子振動を介した非放射遷移により $^3\text{H}_4$ 準位へと高速緩和する。この基底状態吸収に引き続き、励起光子を吸収 (励起状態吸収) して $^3\text{H}_4$ から $^3\text{F}_{2,3}$ へと遷移し、 $^3\text{F}_4$ 準位へと非放射緩和する。これによりレーザ下準位 $^3\text{H}_4$ を減少し、 $^3\text{F}_4$ 数密度を同時に増大させる (図 2-7 参照)。これまでに利得 24 dB、雑音指数 6 dB、出力+17~19 dBm、効率 12~34% が達成されている[35, 37]。

しかしながらアップコンバージョン励起では、利得スペクトルのピークは常に 1.47 μm 帯に存在し、1.49 μm 帯への利得シフトを実現することが困難である。これは以下のように説明できる。アップコンバージョン過程の第 2 段階 ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_{2,3}$) の遷移強度が第 1 段階 ($^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$) の遷移に比べ非常に強く、そのため下準位に留まる Tm イオン数は極めて少ないと予想される。第 1、第 2 段階の吸収断面積はそれぞれ、 $\sigma_{p1}=1.1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_{p2}=8.2 \times 10^{-21}$

cm^2 と見積もられ[25]、およそ 3 桁程度の差があるためである。この場合、平均反転分布率は $\Delta N = 1$ に漸近し、(2-14)式より誘導放出断面積と利得スペクトルは合致する。利得シフト動作に必要な低反転分布が得られないため、従来型 $1.05 \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA では利得シフトは発現しないと考えられる。

さらに利得シフトを阻む以下の 2 点の要因が加わる。L バンド EDFA の類推から濃度条長積を大きく設定したとしても、ASE 光 ($1.46 \mu\text{m}$) は成長するものの 4 準位系であるため、励起パワーが減衰している場所では、下準位 $^3\text{H}_4$ に数密度分布が存在しない。このため利得シフトは発現しない (第 3 章 3.4.3 節に状況をさらに詳しく記述した)。また、もう一つの問題点は波長 $1.50 \mu\text{m}$ より長波側は、基底準位から $^3\text{H}_4$ への基底状態吸収の裾野にかかり、利得を奪われることである[10]。従って従来型アップコンバージョン励起 TDFA においては、媒質自身の持つ誘導放出スペクトル形状と、基底準位吸収に阻まれ、 $1.50 \mu\text{m}$ より長波側で高利得を得ることができない。

2.3.3 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器を実現する新励起方式

以上の議論から、(1) ツリウムイオンにおいて反転分布を形成する代表的手法 ($1.05 \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起法) では利得シフトの実現が不可能であること、(2) 利得シフト動作の実現には下準位数を増大させること (低反転分布 = 3 準位系動作) が本質的に必要であるという指針が示された。その反転分布率はおよそ 0.4 程度とする必要がある。そこで、利得シフト動作実現のため、反転分布形成のための第 1 励起光と、下準位数を増大させる第 2 励起光の 2 波長を導入することを着想した[38-44]。

図 2-9 (a), (b)に着想したスキームを示す。第 1 励起光として、(1) アップコンバージョン励起の $1.05 \mu\text{m}$ 帯 [図 2-9 (a)]と、(2) 下準位から上準位 ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$) への励起状態吸収

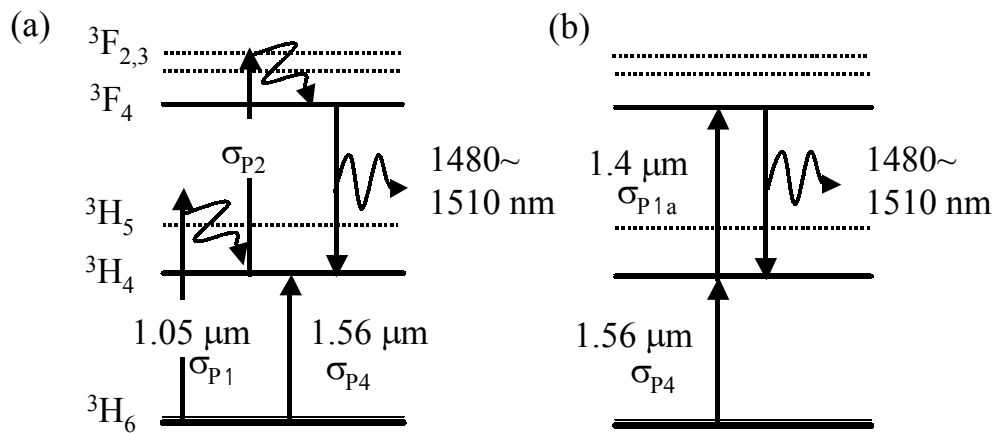


図 2-9 利得シフト TDFA を実現する新たな励起方式

(a) 低雑音励起方式 ($1.05 \mu\text{m}/1.56 \mu\text{m}$) (b) 高効率励起方式 ($1.4 \mu\text{m}/1.56 \mu\text{m}$)

に相当する $1.4\ \mu\text{m}$ 帯 [図 2-9 (b)] の 2 種類が考えられる。そして、第 2 励起光として基底状態吸収 ($^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$) の波長 $1.56\ \mu\text{m}$ の励起光を導入する。寿命が長い下準位を仮想的に基底準位とし 3 準位系と見なすと、(1) は $0.98\ \mu\text{m}$ 励起 EDFA に類似のため、低雑音指数が期待できる。この着想の検証を含め、動作特性を第 3 章にて詳しく述べる。(2) は、励起光子 ($1.4\ \mu\text{m}$) と信号光子 ($1.49\ \mu\text{m}$) の間のエネルギー不整合が小さく ($1.48\ \mu\text{m}$ 励起 EDFA に類似)、3 光子過程による緑青色蛍光が無いいため高い光/光変換効率を期待できる。この励起方式については、発案指針も含め第 4 章にて詳しく述べる。

この $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光を供給する着想の物理的基礎を次に説明する。 $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光の遷移断面積 σ_{P4} はおよそ $2.0 \times 10^{-22}\ \text{cm}^2$ と見積もられ、 $\sigma_{P1} < \sigma_{P4} < \sigma_{P2}$ の関係にある。このため $1.56\ \mu\text{m}$ は $1.05\ \mu\text{m}$ よりも、小パワーで同じだけの Tm イオンを下準位へ励起でき、全体の励起効率を向上できる (利得増強効果)。 $1.05\ \mu\text{m}$ 帯アップコンバージョン励起では反転分布率 $\Delta N=1$ に漸近しているが、 $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光を入射することで、ファイバ中で $1.05\ \mu\text{m}$ 励起光の減衰している領域では下準位数のみを増大でき、ファイバ全域での反転分布率の低減が可能である (利得シフト効果)。さらに基底準位の Tm イオンをより低減できるため、 $1.49\ \mu\text{m}$ 帯での基底状態吸収が低減できる。図 2-9 (b) の $1.4\ \mu\text{m}$ 励起においてもほぼ同様の考察が出来る。 $1.4\ \mu\text{m}$ 励起 ($^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$) の吸収断面積は σ_{P1a} はおよそ $1.6 \times 10^{-21}\ \text{cm}^2$ と見積もられ、 $\sigma_{P4} < \sigma_{P1a}$ である。また $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光の出力パワー、 $1.05\ \mu\text{m}$ 励起光 ($1.4\ \mu\text{m}$ 励起光) と $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光の出力パワー比率、ファイバの濃度条長積等のパラメータを最適化することで、所望の反転分布率に制御することが可能である。

なお $1.65\ \mu\text{m}$ にピークを有する $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 基底状態吸収[10]の中で、短波側の裾野に位置する $1.56\ \mu\text{m}$ 帯を第 2 励起光として選定した。他にも $^3\text{H}_5$ を励起する $1.2\ \mu\text{m}$ 帯も候補としては上げられる。 $1.56\ \mu\text{m}$ 帯選定の理由は、(1) 半導体レーザ、Er ファイバレーザ、EDFA 等の光ファイバ通信システムに良く用いられている既存の光源を利用でき、実用化の際には市販の半導体レーザを使用できること、および (2) 適度な吸収が期待できることである。 $1.65\ \mu\text{m}$ では吸収が強すぎ (およそ $1.56\ \mu\text{m}$ の 30 倍)、ファイバ入射端近傍のみに励起パワーが集中するため、本来ファイバ長手方向全体で利得シフト効果を発現させたいという要求から外れる。 Tm 添加濃度 $2000\ \text{ppm}$ ($N_t=1.68 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$)、 $L=20\ \text{m}$ 長ファイバを仮定すると、吸収率は $\eta_{abs}=1-\exp[-\sigma_{P4}N_tL]=99.8\%$ となり、吸収長とファイバ長がちょうど整合する。

以上の議論を踏まえ、第 2 励起光 $1.56\ \mu\text{m}$ を導入することによる効果を以下にまとめた。

- (1) 利得シフト効果：レーザ下準位 $^3\text{H}_4$ の Tm イオン数を増大させることにより、反転分布率を低減させ、利得シフトを発現する。

- (2) 利得増強効果：レーザ下準位 3H_4 の Tm イオン数を増大させることにより、反転分布に寄与する Tm イオンの総数を増大させる。
- (3) 基底状態吸収の抑制：基底準位数密度を減少させることにより、1.50 μm 帯基底状態吸収を低減する。

2.3.4 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器の数値モデル

2.3.3 節で述べた 2 種類の励起方式の数値モデルを詳述する。2.2 節に述べた通り、ガラス中の希土類イオンにおける発光・吸収遷移はレート方程式および光波の伝搬方程式により記述することが出来る[45]。しかしながら、利得シフト TDFA はおろか、従来型 TDFA さえも数値計算モデルが無い状況であった[46]。

そこで本研究において、新たに利得シフト TDFA および従来型 TDFA の数値モデルを構築し、数値シミュレータを作成した。シミュレータの精度は実験結果との比較を行うことで検証した。数値計算は、後述する Tm イオンのエネルギー準位構造に基づくレート方程式と、励起光（2 波長、前方 / 後方）信号光、ASE 光（Amplified spontaneous emission=増幅された自然放出光：信号帯域、800 nm 帯域、1800 nm 帯域の 3 種類）の伝搬方程式をツリウム添加ファイバ中で反復計算することで達成している。波長多重信号、信号帯域 ASE の波長依存性を考慮し、利得、雑音指数、Tm イオン数のファイバ中での分布が図示できる。なお、これらの式を解くには計算機による数値計算が必須である。

低雑音励起方式（1.05 μm /1.56 μm ）および高効率励起方式（1.4 μm /1.56 μm ）に關与する Tm イオンのエネルギー準位構造と、励起および信号増幅などの放射遷移、非放射遷移を考慮したエネルギー準位モデルを図 2-10 (a)~(d)に示す[25, 46-48]。また計算に際し、ファイバを長手方向に分割し、各セグメント毎にレート方程式と伝搬方程式を解いていく模式図を図 2-11 に示す。各準位に電子が存在する Tm イオン数密度 N_i ($i=0\sim5$: ファイバの軸方向 z の関数、以降単にイオン数密度と言う) に応じて、励起による吸収遷移、ASE による吸収・放出遷移、信号による吸収・放出遷移、自然放出、非放射緩和過程が同時に起こる。そしてファイバの長手方向 (z 軸方向) にイオン数密度の分布を形成する。一方、形成されたイオン数密度分布から、伝搬方程式を介して光波の増幅現象が記述できる。なお、 3F_2 と 3F_3 準位（間隔 530 cm^{-1} ）は、熱的に強く結合していると考えられるため、一つの準位とみなした。

本研究で構築された利得シフト TDFA 数値モデルにおいて、特徴的なことは、

- (1) 利得シフト効果：2.2.2 節で示したとおり、利得シフト動作の記述のためには、信号帯域の励起状態吸収の項 (σ_{sa}) が必要である。

- (2) 信号帯域 ASE 光の必要性 : 雑音指数を定量化すること、増幅器の自己飽和を正しく記述するためには、ASE 光の伝搬方程式を全波長領域で解く必要がある[45]。
- (3) 800 nm および 1800 nm 帯 ASE 光を考慮する必要性 : 800 nm や 1800 nm ASE 光を除外すると、計算上では信号増幅に関与する 3F_4 準位と 3H_4 準位に、ほぼ 100% の Tm イオンが励起されてしまう状況が発生する。この状況は物理的に不合理である。何故なら、Tm イオンが 100% 励起された場合、基底準位は完全に零になり、800 nm や 1800 nm に対し反転分布が形成されるはずであり、これらの光波が発生しないという前提が根拠を失うからである。この状態のときには 800 nm と 1800 nm ASE 光が発生して、ツリウムイオンを基底準位へと発光緩和させると考えるほうが自然である。実際には、これらの ASE 光は観測出来ていないが、おそらく Tm ファイバ中にて発生しているものと考えている。
- (4) WDM 信号増幅 : 信号の伝搬方程式を複数の WDM 信号それぞれについて解く。
- (5) EDFA との相違 :
- ・ 関与している準位数が EDFA では 3 つに対し、TDFA では 6 個であること (EDFA のエネルギー準位構造 図 2-3 参照)。
 - ・ EDFA では基底準位と直上の励起準位との間の誘導遷移を計算するのに対し、TDFA では励起準位間の自己終端型の誘導遷移に注目していること。
- この 2 点から、EDFA シミュレータ (例えば市販品 : Optiwave 社の *OptiAmplifier* [49]) を使用することが困難である。

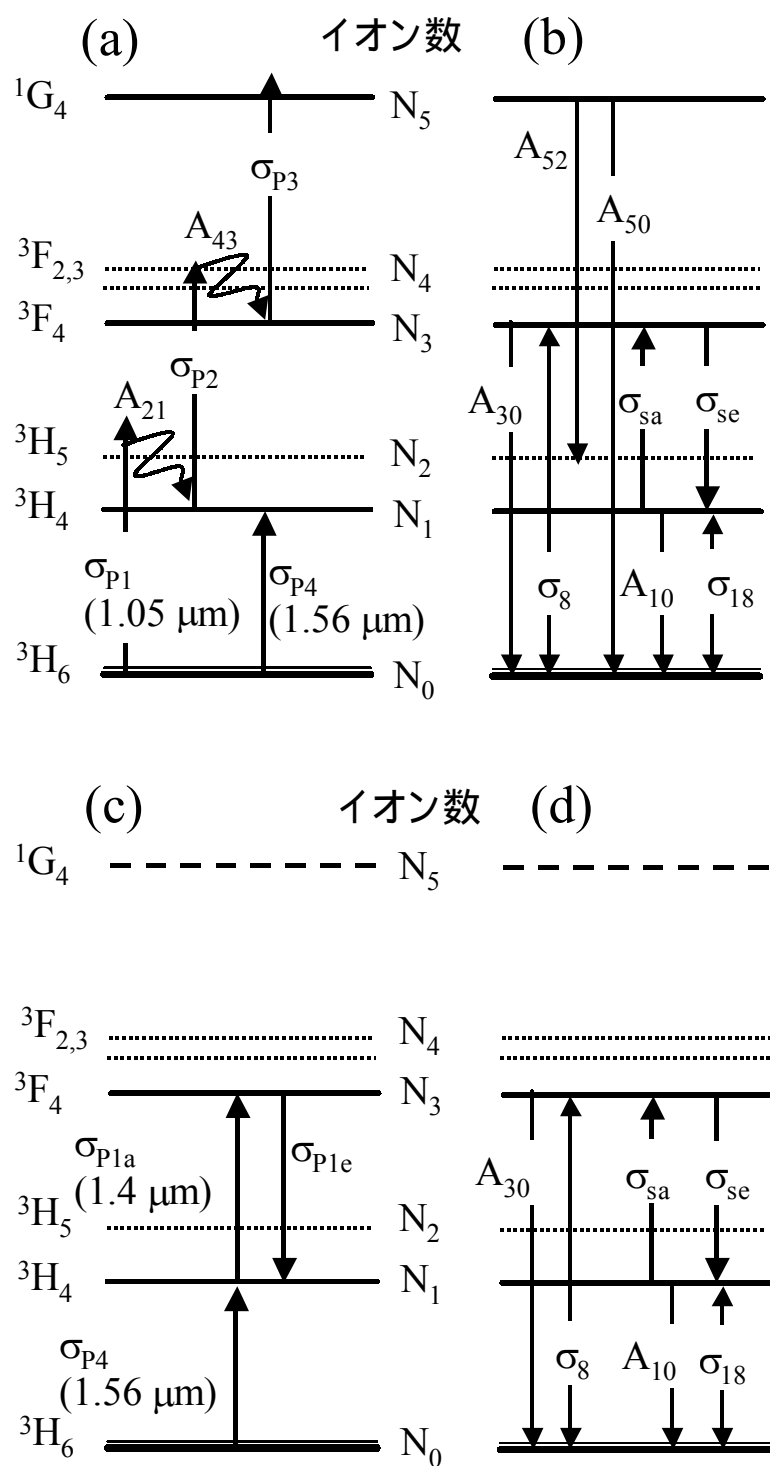


図 2-10 利得シフト TDFA のエネルギー準位モデル

- (a),(b) : 低雑音励起方式 $1.05 \mu\text{m}/1.56 \mu\text{m}$ 2 波長励起モデル
(c),(d) : 高効率励起方式 $1.4 \mu\text{m}/1.56 \mu\text{m}$ 2 波長励起モデル
(a), (c) : 励起遷移 (b), (d) : 発光遷移

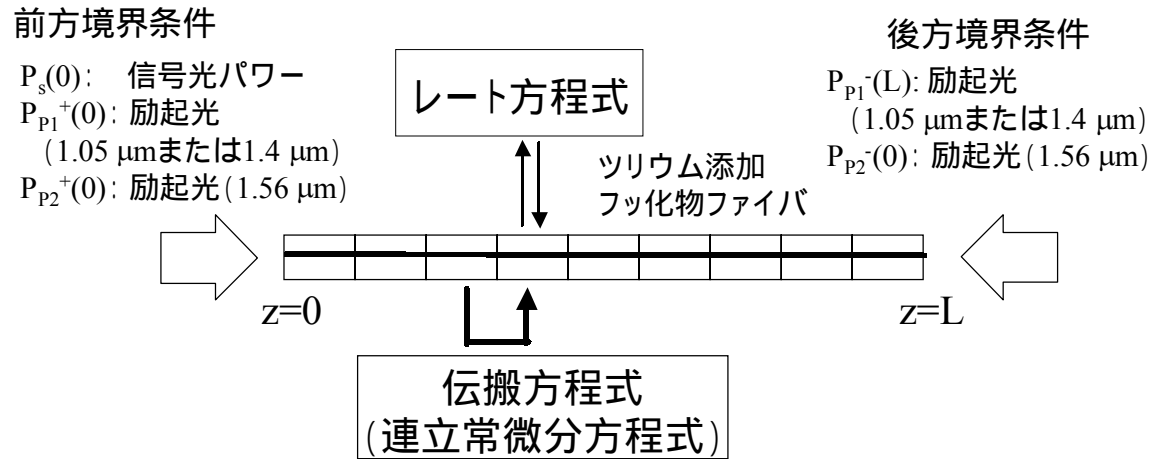


図 2-11 TDFEA の数値計算の模式図

2.3.4.1 低雑音励起方式のレート方程式数値モデル

図 2-10 (a) (b)のエネルギー準位構造から、各準位の Tm イオン数密度 N_i ($i=0\sim5$: ファイバの軸方向 z の関数) に対して以下のレート方程式が成立する[25, 46-48]。

$$\frac{dN_0}{dt} = -(W_{p1} + W_{p4} + W_{18} + W_8)N_0 + (A_{10} + W_{18})N_1 + (A_{30} + W_8)N_3 + A_{50}N_5 \quad (2-19)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = (W_{p4} + W_{18})N_0 - (A_{10} + W_{p2} + W_{sa} + W_{18})N_1 + A_{21}N_2 + W_{se}N_3 \quad (2-20)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{p1}N_0 - A_{21}N_2 + A_{52}N_5 \quad (2-21)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_8N_0 + W_{sa}N_1 - (A_{30} + W_{p3} + W_{se} + W_8)N_3 + A_{43}N_4 \quad (2-22)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{p2}N_1 - A_{43}N_4 \quad (2-23)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{p3}N_3 - (A_{50} + A_{52})N_5 \quad (2-24)$$

$$\sum_i N_i = N_t \quad (2-25)$$

ここで、 W_{pi} , $i=1\sim4$: 励起レート、 W_{sa} , W_{se} : 信号帯域 (1.49 μm 帯) の吸収および誘導放出レート、 W_8 , W_{18} : 800 nm 帯、1800 nm 帯 ASE 光による遷移レートであり、それぞれ次式で定義される。また A_{ij} : 自然放出レートまたは非放射遷移レート、 N_t : Tm イオン添加濃度である。また正負号+, -はそれぞれ順方向、逆方向に伝搬する光波を示す。

各遷移レートは次式で表される。

$$W_{P_i} = \frac{\sigma_{P_i} (P_{P_1}^+ + P_{P_1}^-)}{h\nu_{P_1} A_{eff}} \quad (i=1 \sim 3) \quad (2-26)$$

$$W_{P_4} = \frac{\sigma_{P_4} (P_{P_2}^+ + P_{P_2}^-)}{h\nu_{P_2} A_{eff}} + \int \frac{\sigma_{P_4} (P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-)}{h\nu_{ASE} A_{eff}} d\nu + \int \frac{\sigma_{P_4} P_s}{h\nu_s A_{eff}} d\nu \quad (2-27)$$

$$W_{sa,se} = \frac{\sigma_{sa,se} P_s}{h\nu_s A_{eff}} + \int \frac{\sigma_{sa,se} (P_{ASE}^+ + P_{ASE}^-)}{h\nu_{ASE} A_{eff}} d\nu \quad (2-28)$$

$$W_{8,18} = \frac{\sigma_{8,18} (P_{ASE}^{8,18+} + P_{ASE}^{8,18-})}{h\nu_{ASE}^{8,18} A_{eff}} \quad (2-29)$$

一方、光波の伝搬方程式は、ファイバ長手方向を z 軸として、以下の連立常微分方程式で表される。

$$\frac{dP_s}{dz} = \Gamma(\lambda_s) (\sigma_{se}(\lambda) N_3 - \sigma_{sa}(\lambda) N_1 - \sigma_{P_4}(\lambda) N_0) P_s - \alpha P_s \quad \text{信号パワー} \quad (2-30)$$

$$\frac{dP_{P_1}^{\pm}}{dz} = \mp \Gamma(\lambda_{P_1}) (\sigma_{P_1} N_0 + \sigma_{P_2} N_1 + \sigma_{P_3} N_3) P_{P_1}^{\pm} \mp \alpha P_{P_1}^{\pm} \quad \text{励起パワー} \quad (2-31)$$

(1.05 μm)

$$\frac{dP_{P_2}^{\pm}}{dz} = \mp \Gamma(\lambda_{P_2}) \sigma_{P_4} N_0 P_{P_2}^{\pm} \mp \alpha P_{P_2}^{\pm} \quad \text{励起パワー} \quad (2-32)$$

(1.56 μm)

$$\frac{dP_{ASE}(\lambda)^{\pm}}{dz} = \pm \Gamma(\lambda_{ASE}) (\sigma_{se}(\lambda_{ASE}) N_3 - \sigma_{sa}(\lambda_{ASE}) N_1 - \sigma_{P_4}(\lambda_{ASE}) N_0) P_{ASE}^{\pm} \pm \Gamma(\lambda) 2h\nu \Delta\nu \sigma_{se}(\lambda_{ASE}) N_3 \mp \alpha P_{ASE}^{\pm} \quad \text{ASE 光} \quad (2-33)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{18\pm}}{dz} = \pm \Gamma(\lambda_{18}) \sigma_{18}(\lambda_{18}) (N_1 - N_0) P_{ASE}^{18\pm} \pm \Gamma(\lambda_{18}) 2h\nu \Delta\nu \sigma_{18}(\lambda_{18}) N_1 \mp \alpha P_{ASE}^{18\pm} \quad \text{1800nm 帯 ASE 光} \quad (2-34)$$

$$\frac{dP_{ASE}^{8\pm}}{dz} = \pm \Gamma(\lambda_8) \sigma_8(\lambda_8) (N_3 - N_0) P_{ASE}^{8\pm} \pm \Gamma(\lambda_8) 2h\nu \Delta\nu \sigma_8(\lambda_8) N_3 \mp \alpha P_{ASE}^{8\pm} \quad \text{800nm 帯 ASE 光} \quad (2-35)$$

ただし、 α : Tm 添加ファイバの背景損失である。

さらに常微分方程式(2-30)～(2-35)式の境界条件 (ファイバの入射端 $z=0$ 、出射端 $z=L$ の値) として、 $P_s(0)$: ファイバ入力信号パワー、 $P_{P_1}^+(0)$: 前方励起パワー (1.05 μm)、 $P_{P_1}^-(L)$: 後方励起パワー (1.05 μm)、 $P_{P_2}^+(0)$: 前方励起パワー (1.56 μm)、 $P_{P_2}^-(L)$: 後方励起パワー (1.56 μm) を与える。また ASE 光パワーについては、 $P_{ASE}^+(0)$,

$P_{ASE}^-(L)=0$: (信号、800 nm、1800 nm) となる。これらの条件を与えることで z 軸方向の Tm イオン数分布と光波パワー分布を計算することが出来る。

2.2.2 節における EDFA の場合と同様、TDFA においても平均反転分布率 ΔN と局所反転分布率 $\Delta N(z)$ を定義できる。ただし $\overline{N_i}$ は(2-16)式と同じ定義である。

$$\Delta N = \overline{N_3} / [\overline{N_1} + \overline{N_3}] \quad (2-36)$$

$$\Delta N(z) = N_3(z) / [N_1(z) + N_3(z)] \quad (2-37)$$

2.3.4.2 高効率励起方式のレート方程式数値モデル

高効率励起方式の場合、図 2-10 (c), (d) のモデルから以下のようなレート方程式が得られる。関与する準位数は、低雑音励起方式に比べ大幅に減ることも特徴的である。

$$\frac{dN_0}{dt} = -(W_{P4} + W_8 + W_{18})N_0 + (A_{10} + W_{18})N_1 + (A_{30} + W_8)N_3 \quad (2-38)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = (W_{P4} + W_{18})N_0 - (A_{10} + W_{P1a} + W_{sa} + W_{18})N_1 + (W_{se} + W_{P1e})N_3 \quad (2-39)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_8N_0 + (W_{P1a} + W_{sa})N_1 - (A_{30} + W_{P1e} + W_{se} + W_8)N_3 \quad (2-40)$$

一方、光波の伝搬方程式は以下ようになる。ただし励起パワー以外の式は低雑音励起方式と同じなので省略した。

$$\frac{dP_{P1}^{\pm}}{dz} = \pm \Gamma(\lambda_{P1}) (\sigma_{P1e}N_3 - \sigma_{P1a}N_1) P_{P1}^{\pm} \mp \alpha P_{P1}^{\pm} \quad 1.4\mu\text{m 励起パワー} \quad (2-41)$$

$$\frac{dP_{P2}^{\pm}}{dz} = \mp \Gamma(\lambda_{P2}) \sigma_{P4}N_0 P_{P2}^{\pm} \mp \alpha P_{P2}^{\pm} \quad 1.56\mu\text{m 励起パワー} \quad (2-42)$$

2.3.4.3 数値計算手法

厳密には、レート方程式(2-19)~(2-25)式あるいは(2-38)~(2-40)式までを、時間 t 、空間 z 、周波数(波長 λ) の 3 つの次元で解く必要があるが、通常は時間項を無視することが多い。すなわち入力信号の変調速度が TDFA の応答速度(上準位寿命 1.4 msec の逆数で決まる周波数 ~ 714 Hz) より、十分ゆっくりとした場合か、十分早い場合、レート方程式における時間微分は $d/dt=0$ として無視することが出来る。この場合、TDFA の過渡的応答(入力信号パワーや励起パワーが変化したときの、利得や出力などの時間応答) は計算できなくなる

が、実用上は十分である。なぜなら通常の場合、TDFA に入射する信号光には数 Gb/s 級のデータの強度変調が掛けられており、TDFA の応答速度をはるかに凌いでいるためである。このとき TDFA は平均入力信号パワーのみを感じることになる[50]。

波長多重信号の場合、各波長に対し信号パワー伝搬式(2-30)式を解いていくことに相当する。さらに ASE スペクトル幅 $\Delta\nu=2\text{ nm}$ (およそ 267 GHz) とした場合、1380 ~ 1550 nm の自然放出光を 85 分割し、それぞれについて ASE 光伝搬式(2-33)式を解くことになる。800 nm 帯域 ASE 光と 1800 nm 帯域 ASE 光のスペクトル幅は、それぞれの蛍光スペクトル幅に相当する $\Delta\nu=10\text{ nm}$ 、100 nm とし、スペクトル分割を行わず、一波長の光波として取り扱った。この理由は、これらの光は信号帯域の光に対し、遷移レート W_8 , W_{18} でしか関与せず、スペクトル分割された詳細な計算が必要ないためである。

プログラミングには、汎用の数値計算・数式処理ソフトウェア「*Mathematica ver. 3.0*」(Wolfram Research 社)を用いた。16 波の波長多重信号を想定し、信号帯域 ASE スペクトル幅 $\Delta\nu=2\text{ nm}$ 、ファイバ分割数 200 としたとき、典型的な計算精度は 0.01%以下、計算時間はおよそ 30 分 (Pentium 450 MHz) であった。

2.3.4.4 数値計算に用いたパラメータ

以下の表 2-3 のパラメータを用いた。数値計算では、入力パラメータの精度や確度が計算結果の確からしさを決定するため、その選定方法に十分に注意を払った (付録 A 参照)。

表 2-3 利得シフト TDFA の数値シミュレーションに用いたパラメータ (付録 A 参照)

項目	単位	記号	数値	備考
ツリウム 添加濃度	1/cm ³	N_t	1.68×10^{19}	メーカーより密度データ (4.7 g/cm ³) を入手し、文献[51]から計算。
コア直径	μm	$2a$	1.9	メーカー仕様
比屈折率差	%		3.7	メーカー仕様
V パラメータ		V	1.475 (1.49 μm) ~ 2.177 (1.05 μm)	$V = 2\pi a NA / \lambda$ から計算。
開口数		NA	0.383 ~ 0.400	$NA = \sqrt{2\Delta n_1}$ およびカットオフ波長 (0.95 μm) から計算により推定
長さ	cm	L	500 ~ 4000	実験に使用したモジュール仕様。
信号波長	nm		1450 ~ 1540	1.49 μm 帯
ASE 帯域幅	nm	$\Delta\nu$	2 (1~4)	精度・計算速度に依存。計算では周波数 Hz に変換。
800nmASE 帯	nm	$\Delta\nu$	10	蛍光幅より均一広がり幅を推定

域幅				[10,28]。
1800nmASE	nm	$\Delta\nu$	100	蛍光幅より均一広がり幅を推定
帯域幅				[10,28]。
ASE 帯域	nm		1380 ~ 1550	実験および誘導放出断面積より。
自然放出	1/s	A_{10}	172.4	文献[52, 53]
レート	1/s	A_{30}	702.8	文献[52, 53]
	1/s	A_{50}	676.3	文献[52, 53]
	1/s	A_{52}	492.9	文献[52, 53]
非放射遷移	1/s	A_{43}	52986	直下のエネルギー準位との間隔を
レート				2600 cm^{-1} とし[25]、非放射遷移確率
	1/s	A_{21}	195626	を計算。
				直下のエネルギー準位との間隔を
				2270 cm^{-1} とし[25]、非放射遷移確率
				を計算。
背景損失	dB/cm	α	0.1	カタログより。
誘導放出	cm^2	σ_{se}	2.4×10^{-21}	2.0 ~ 6.7 の値の中で、実験と合致す
断面積				るものを選定[30]。
(ピーク)				
信号吸収	cm^2	σ_{sa}	1.68×10^{-21}	McCumber 関係式[21]より推定。励起
断面積				エネルギー $\varepsilon=1440 \text{ nm}$ とした。
(ピーク)				
励起吸収	cm^2	σ_{P1}	1.1×10^{-23}	文献[25,35]。
断面積	cm^2	σ_{P2}	8.2×10^{-21}	文献[25, 37, 54]、実験との比較。
	cm^2	σ_{P3}	2.5×10^{-23}	文献[25]より推定。実験との比較。
	cm^2	σ_{P4}	2.0×10^{-22}	文献[10]、および実測。
	cm^2	σ_8	6.0×10^{-21}	文献[10, 28, 30]
	cm^2	σ_{18}	5.0×10^{-21}	文献[10, 28, 30]
オーバーラ		$\Gamma(\lambda_{P1})$	0.762	励起波長 1.05 μm
ップ因子		$\Gamma(\lambda_{P2})$	0.441	励起波長 1.56 μm
		$\Gamma(\lambda_s)$	0.500	信号波長 1.49 μm
		$\Gamma(\lambda_8)$	0.870	ASE 波長 800 nm
		$\Gamma(\lambda_{18})$	0.280	ASE 波長 1800 nm
ファイバ			200 ~ 1000	精度・計算スピードに依存。
分割数				
収束判定			10^{-4} (典型値)	0.01% (4.3×10^{-4} dB 以下)

2.4 まとめ

本章では、最初に固体中の希土類イオンのエネルギー準位構造および発光・吸収スペクトルの特徴を説明し、EDFAでの利得シフト原理について考察した。その結果、利得シフト動作に必要な条件は低反転分布（ ~ 0.4 ）であり、他の希土類イオンでも実現可能であることが分かった。そこで、Tm イオンを添加したツリウム添加ファイバ増幅器での利得シフト動作を検討した結果、従来型 $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA では、利得シフトが極めて困難であることが判明した。そこで利得シフトを実現する新たな励起方式を 2 種類考案した。すなわち低雑音励起および高効率励起方式である。最後に新励起方式の数値モデルを構築した。

以下に本章で得られた主要成果をまとめる。

- (1) 固体中の希土類イオンのエネルギー準位構造および発光・吸収スペクトルの特徴や非放射遷移の振る舞いを説明した。さらに EDFA で通常行われている利得シフト動作について、原理から詳細に論じた。その結果、この原理が Er イオンに限らず、固体に添加された任意の希土類イオンに適用できることを示した。
- (2) 本研究での主眼であるツリウムイオンについて利得シフトを実現する条件について考察した。その結果、反転分布率を 0.4 (40%) 程度まで低減することが出来れば、原理的に、利得ピーク波長が $1.46\ \mu\text{m}$ から $1.49\ \mu\text{m}$ へと長波シフトしうることを初めて示した。そして従来の TDFA の報告例と動作原理について考察し、従来からの $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA では利得シフトが実現出来ないことを明らかにした。その理由は、レーザ下準位数が極めて零に近く、反転分布が極めて 1 に近い (4 準位系動作) と考えられるからである。すなわち利得ピーク波長は、蛍光スペクトルのピーク波長と同じく波長 $1.46\ \mu\text{m}$ にあり、利得プロファイルの制御が出来ないことを意味している。
- (3) TDFA において利得シフトを実現するための新励起方式 (2 種類) を発案し、その物理的根拠を述べた。2 つの励起方式に共通する重要な点は、 $1.56\ \mu\text{m}$ 励起光を加えることで、レーザ下準位 $^3\text{H}_4$ のイオン数を増大させることである。励起方式の一つは、 $1.05\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$ の 2 波長励起であり、 $0.98\ \mu\text{m}$ 励起 EDFA との類似性から、低雑音励起が期待できる。一方、もう一つの励起方式は、 $1.4\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$ の 2 波長励起であり、励起光子エネルギーと信号光子エネルギーの不整合が小さいため、高い光/光変換効率が期待できる。これらの実証はそれぞれ第 3 章、第 4 章に述べる。

- (4) 発案した励起方式を記述する数値モデルを構築した。励起光、信号光、信号帯域 ASE 光および増幅自然放出遷移 (800 nm 帯、1800 nm 帯) を含めたレート方程式および伝搬方程式を詳細に記述した。

参考文献

- [1] 櫛田孝司、「光物性物理学」、朝倉書店、第 5 章、1991 年。
- [2] 須藤昭一編、「エルビウム添加光ファイバ増幅器 ～情報通信ネットワークに革命をもたらすキーデバイス～」、オプトロニクス社、第 1 部第 1 章、第 1 部第 2 章、1999 年。
- [3] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapter 1, 1994.
- [4] 田部勢津久、平尾一之、「青色アップコンバージョンレーザガラス –短波長固体レーザ実現の新たなアプローチ–」、電気学会論文誌 A、第 114 巻第 6 号、pp. 425-431、1994 年。
- [5] 田部勢津久、「希土類化合物の光機能とアップコンバージョン特性」、希土類、第 23 巻、pp. 67-94、1993 年。
- [6] 井上博之、牧島亮男、「Tm:ZBLAN の光増幅」、第 47 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集、論文 31a-YE-3、2000 年 3 月。
- [7] K. Soga, H. Inoue, and A. Makishima, “Calculation and simulation of spectroscopic properties for rare earth ions in chloro-fluorozirconate glasses,” *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 274, pp. 69-74, 2000.
- [8] A. Yariv 著、多田邦雄、神谷武志訳、「光エレクトロニクスの基礎」、丸善、第 5 章、1988 年。
- [9] P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology*, Academic Press, Chapter 4, 1999.
- [10] W. J. Miniscalco, “Optical and electronic properties of rare earth ions in glasses,” in *Rare earth doped fiber lasers and amplifiers*, ed., M. J. F. Digonnet, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [11] M. D. Shinn, W. A. Sibley, M. G. Drexhage, and R. N. Brown, “Optical transitions of Er^{3+} ions in fluoride glass,” *Phys. Rev. B*, vol. 27, no. 11, pp. 6635-6648, 1983.
- [12] 石尾秀樹監修、「光増幅器とその応用」、オーム社、第 5 章、1992 年。
- [13] 矢島達夫、霜田光一、稲場文男、難波進編、「新版レーザーハンドブック」、朝倉書店、第 2 章、pp. 22-35、1989 年。
- [14] 石尾秀樹監修、「光増幅器とその応用」、オーム社、第 2 章、1992 年。

- [15] W. Imajuku, A. Takada, and Y. Yamabayashi, "In-line coherent optical amplifier with noise figure under the 3-dB quantum limit," ECOC'99, postdeadline paper PDP-1, 1999.
- [16] M. Kakui and S. Ishikawa, "Long-wavelength-band optical amplifiers employing silica-based erbium doped fibers designed for wavelength division multiplexing systems and networks," IEICE Trans. Electron., vol. E83-C, no. 6, pp. 799-815, 2000.
- [17] J. F. Massicott, J. R. Armitage, R. Wyatt, B. J. Ainslie, S. P. Craig-Ryan, "High gain, broadband, 1.6 μ m Er³⁺ doped silica fibre amplifier," Electron. Lett., vol. 26, no. 20, pp. 1645-1646, 1990.
- [18] H. Ono, M. Yamada, and Y. Ohishi, "Gain-flattened Er³⁺-doped fiber amplifier for a WDM signal in the 1.57-1.60- μ m wavelength region," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 5, pp. 596-598, 1997.
- [19] I. Yamashita, K. Shimoura, S. Seikai, and T. Fukuoka, "Er³⁺ doped fibre amplifier operating at wavelengths of 1.55 and 1.60 μ m," Electron. Lett., vol. 32, no. 12, pp. 1102-1103, 1996.
- [20] M. Fukushima, Y. Tashiro, and H. Ogoshi, "Flat gain erbium-doped fiber amplifier in 1570nm-1600nm region for dense WDM transmission systems," OFC'97, paper PD3, 1997.
- [21] D. E. McCumber, "Theory of phonon-terminated optical masers," Phys. Rev., vol. 134, no. 2A, pp. A299-A306, 1964.
- [22] 霜田光一、矢島達夫、"量子エレクトロニクス (上)、" 裳華房、第 3 章、p. 246、1972 年.
- [23] H. W. Gandy, R. J. Ginther, and J. F. Weller, "Stimulated emission of Tm³⁺ radiation in silicate glass," J. Appl. Phys., vol. 38, pp. 3030-3031, 1967.
- [24] A. Chandonnet and P. Laperle, "Photodegradation of fluoride glass blue fiber laser," SPIE vol. 2998, pp. 70-81, 1997.
- [25] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, "Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μ m," IEEE J. Quantum Electron., vol. 31, no. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [26] S. Sudo ed., *Optical fiber amplifiers: Materials, devices, and applications*, Artech House, Inc., Chapter 2, p. 104, 1997.
- [27] F. Roy, D. Bayart, C. Heerdt, A. Le Sauze, and P. Baniel, "Spectral hole burning measurement thulium-doped fiber amplifiers," Opt. Lett., vol. 27, no. 1, pp. 10-12, 2002.
- [28] J. Y. Allain, M. Monerie, and H. Poignant, "Tunable CW lasing around 0.82, 1.48, 1.88 and 2.35 μ m in thulium-doped fluorozirconate fibre," Electron. Lett., vol. 25, no. 24, pp. 1660-1662, 1989.

- [29] R. M. Percival, D. Szebesta, and S. T. Davey, "Highly efficient CW cascade operation of 1.47 and 1.82 μ m transitions in Tm-doped fluoride fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 20, pp. 1866-1868, 1992.
- [30] R. Allen, L. Esterowitz, and I. Aggarwal, "An efficient 1.46 μ m thulium fiber laser via a cascade process," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 303-306, 1993.
- [31] T. Sakamoto, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Terunuma, Y. Ohishi, M. Yamada, and S. Sudo, "1.4- μ m-band gain characteristics of a Tm-Ho-doped ZBLAN fiber amplifier pumped in the 0.8- μ m band," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 9, pp. 983-985, 1995.
- [32] R. M. Percival, D. Szebesta, and S. T. Davey, "Thulium doped terbium sensitized CW fluoride fibre laser operating on the 1.47 μ m transition," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 12, pp. 1054-1056, 1993.
- [33] Y. Miyajima, T. Komukai, and T. Sugawa, "1-W CW Tm-doped fluoride fibre laser at 1.47 μ m," *Electron. Lett.*, vol. 29, no.8, pp. 660-661, 1993.
- [34] R. M. Percival, D. Szebesta, and J. R. Williams, "Highly efficient 1.064 μ m upconversion pumped 1.47 μ m thulium doped fluoride fibre laser," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 13, pp. 1057-1058, 1994.
- [35] R. M. Percival and J. R. Williams, "Highly efficient 1.064 μ m upconversion pumped 1.47 μ m thulium doped fluoride fibre amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 20, pp. 1684-1685, 1994.
- [36] T. Sakamoto, S. Aozasa, T. Kanamori, K. Hoshino, M. Yamada, and M. Shimizu, "Gain-equalized thulium-doped fiber amplifiers for 1460 nm-band WDM signals," in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA'99)*, paper WD2, 1999.
- [37] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi, and M. Shimizu, "Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp. 1331-1333, 2000.
- [38] T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "Novel 1.50- μ m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier by using dual wavelength pumping of 1.05 and 1.56 μ m," in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA'99)*, postdeadline paper PDP1, 1999.
- [39] T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "1.50- μ m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μ m dual-wavelength pumping," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 23, pp. 1684-1686, 1999.
- [40] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for future broadband DWDM networks," in *Proc Optoelectronics and Communications Conference*

(OECC2000), paper 14B4-1, p. 508, 2000.

- [41] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51- μ m wavelength region," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, no. 1, pp. 31-33, 2001.
- [42] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Laser-diode pumping (1.4 and 1.56 μ m) of gain-shifted thulium-doped fibre amplifier," Electron. Lett., vol. 36, no. 19, pp. 1607-1609, 2000.
- [43] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, " Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band," OFC2001, paper TuQ4, 2001.
- [44] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, " Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, no. 5, pp. 433-435, 2001.
- [45] C. R. Giles and E. Desurvire, "Modeling erbium-doped fiber amplifiers," J. Lightwave. Technol., vol. 9, no. 2 , pp. 271-283, 1991.
- [46] W. J. Lee, B. Min, J. Park, and N. Park, "Study on the pumping wavelength dependency of S⁺-band fluoride based thulium doped fiber amplifiers," OFC2001, paper TuQ5, 2001.
- [47] S. D. Jackson and T. A. King, "Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers," J. Lightwave Technology, vol. 17, no. 5, pp. 948-956, 1999.
- [48] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "1.49- μ m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for WDM transmission systems," IEEE J. Lightwave Technol., *accepted for publication*.
- [49] Optiwave 社ホームページ : <http://www.optiwave.com/>
- [50] J. O. Byun, W. J. Lee, C. H. Lee, and N. Park, "Study on the transient response for 1.4 μ m/1.5 μ m dual wavelength pumped thulium-doped fiber amplifiers," OFC2002, paper ThZ2, 2002.
- [51] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 242-243, 1994.
- [52] C. Guery, J. L. Adam, and J. Lucas, "Optical properties of Tm³⁺ ions in indium-based fluoride glasses," J. Luminescence, vol. 42, pp. 181-189, 1988.
- [53] J. Sanz, R. Cases, and R. Alcalá, "Optical properties of Tm³⁺ in fluorozirconate glass," J. Non-Crystal. Solids, vol. 93, pp. 377-386, 1987.
- [54] R. S. Quimby and X. Song, "Excited-state absorption spectra in Tm³⁺-doped fluoride glass," in *Proc. Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO'93)*, paper CThF5, 1993.

第3章 低雑音励起方式利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器

3.1 まえがき

本章では、第2章で提案した低雑音励起方式 ($1.05\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$) 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) において、2.3.4.1 節の数値モデルを用いた反転分布の理論解析を行い、低雑音励起 TDFA と従来の $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA の動作特性の違いを浮き彫りにする。続いて利得シフト TDFA を構成し、動作特性について詳細に説明する。実験で得られた動作特性を数値計算により再現すると共に、数値モデルの妥当性について実証する。さらに変調速度 $10\ \text{Gb/s}$ の波長多重信号に対し光前置増幅受信を行った際の符号誤り率特性を測定し、この変調速度での使用に基本的な問題が無いことを示す。また TDFA の信頼性、特に Tm ファイバにて多発した光損傷についても言及する。最後に実用的な新規励起光源としての半導体レーザ励起 Yb:YAG 固体レーザの開発について、原理提案、設計と試作結果について述べ、利得シフト TDFA の実用性を傍証する。

3.2 反転分布の数値解析

本節では第2章で記述した数値モデルを用い、 $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA ならびに低雑音励起 TDFA の反転分布率の計算を行い、それらの特徴的な振る舞いを説明する。特に第2章 2.3.3 節で述べた着想、すなわち2波長励起による利得シフト効果（低反転分布率）と利得増強効果を理論的に実証する。合わせて、本励起方式が低雑音を提供することを示す。図3-1に想定した低雑音励起 TDFA の模式図を示す。入力信号パワー $-30\ \text{dBm}$ 、信号波長 $1470\ \text{nm}$ 、ツリウム添加濃度 $2000\ \text{ppm}$ 、ファイバ長 $20\ \text{m}$ 、励起波長 $1.05\ \mu\text{m}$ および $1.56\ \mu\text{m}$ とした。2波長で Tm ファイバを前方励起する構成を想定した。

3.2.1 $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA

$1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起 TDFA における利得と雑音指数の Tm ファイバ中での長手方向依存性について説明する。信号波長は $1470\ \text{nm}$ とした。図3-2 (a), (b)に励起パワー $10\sim 300\ \text{mW}$ のときの利得 (a)、雑音指数 (b)を示す。横軸はファイバの長手方向位置 $z\ [\text{m}]$ である。利得はファイバ中を伝搬するに従い単調に増加していく。励起パワーが増大するにつれ、利得は単調に向上する。 $300\ \text{mW}$ のとき最大利得 $28.8\ \text{dB}$ を得た。雑音指数は励起パワー増大に伴い減少し、励起パワー $300\ \text{mW}$ のとき、ファイバの最初の $5\ \text{m}$ でショット雑

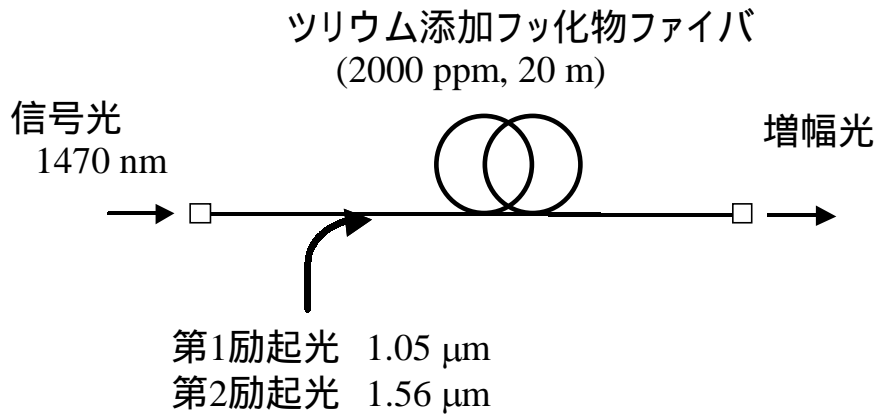


図 3-1 反転分布の計算に用いた構成図

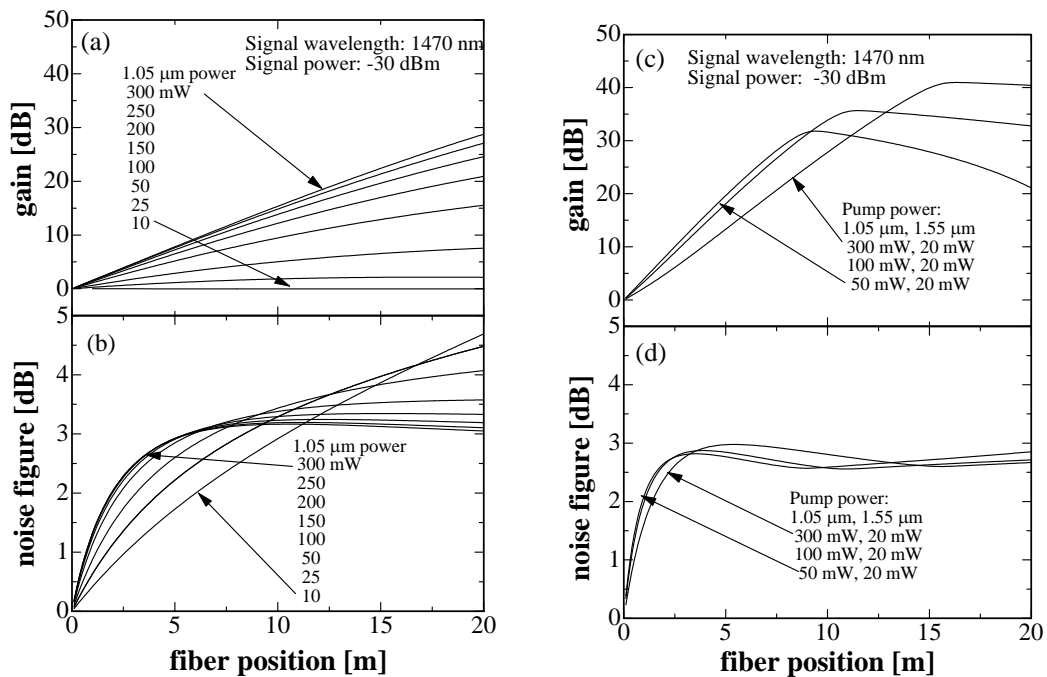


図 3-2 利得、雑音指数のファイバ位置依存性（計算結果）

(a),(b) : 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA

(c),(d) : 低雑音励起 (1.05 μm /1.56 μm) 利得シフト TDFA

音が支配的な領域（すなわち第 2 章(2-11)式で、第 1 項 $1/G(\lambda)$ が、第 2 項より大きい領域）から、信号 - ASE 間ビート雑音が支配的な領域（同式第 2 項が大きい領域）へと移行し、その後は一定となることが分かった。雑音指数およそ 3.1 dB が得られた。

まず利得特性において EDFA と異なる特徴的なことに気付く。すなわち低い励起パワーにおいて利得が急激に低下するようなことが無いことである。第 2 章(2-5)式を参照すれば

理解できるが、EDFA では励起されない部分は（つまり $N_1 \cong 0$ の部分）信号に対し基底状態吸収損失 $\sigma_{sa} N_0 \cong \sigma_{sa} N_t$ を与えるので、励起パワーを減少させていくと、急激に利得が低減する。換言すれば、ある励起パワーに対し明確に最適ファイバ長が存在する[1-3]。これに対し、第2章(2-30)式を参照すれば、TDFA では励起されていない部分では、信号に対して基本的に伝搬損失のみであることが分かる。何故なら非励起の熱平衡状態では、レーザ下準位 3H_4 のイオン密度 N_1 は零であるためである。このため TDFA においては、最適ファイバ長が明確には現れない。EDFA は純粋に3準位系であるのに対し、1.05 μm 励起 TDFA はほぼ4準位系とみなして良いとも言える。このことはNTTの小向等[4]、阪本等[5]により主に実験結果から推測されていたが、本研究で初めて理論的に明らかになった[6]。4準位系のエネルギー準位構造と自己終端型を合わせ持つ TDFA において、下準位寿命（9 msec）は極めて長いにもかかわらず、1.05 μm アップコンバージョン励起では4準位に極めて近い動作をすることが判明した。と同時に、下準位密度が零とみなせるため、1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA では、利得シフト動作が実現できないことも強く示唆している。

一方図3-2 (b)より特筆すべきは、1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA の雑音指数は高励起パワー（>200 mW）においても量子限界 3 dB に到達せず、わずか 0.1 ~ 0.5 dB ほどではあるが、3 dB より大きいことである。これは各エネルギー準位の広がりを無視した簡単なモデル[4]では説明できない。単純化されたモデルでは、励起パワーが十分大きい極限に

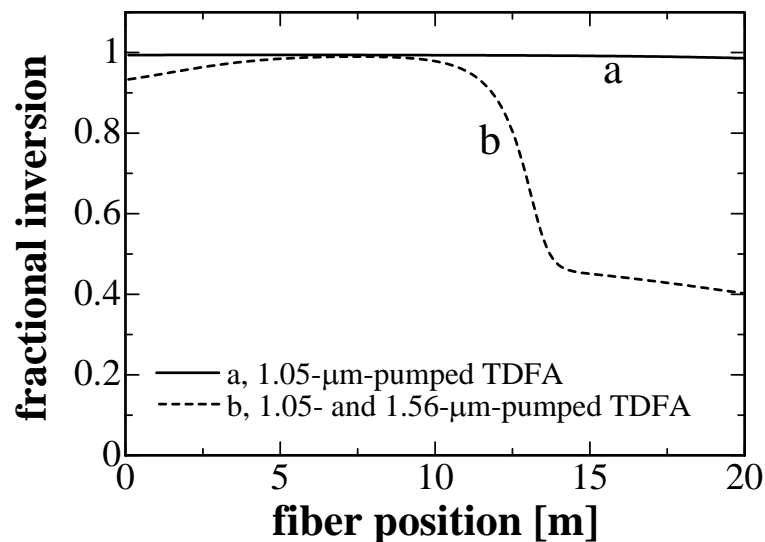


図3-3 局所反転分布率のファイバ位置依存性（計算結果）

スペクトル a、1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA

スペクトル b、低雑音励起（1.05 μm /1.56 μm ）利得シフト TDFA

において、雑音指数は上準位イオン数 N_3 、下準位イオン数 N_1 、励起光の吸収断面積 $\sigma_{p2} (^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_{2,3})$ 、 $\sigma_{p3} (^3\text{F}_4 \rightarrow ^1\text{G}_4)$ を用いて、

$$NF_{\min} = \min \left(\frac{N_3}{N_3 - N_1} \right) = \lim_{P \rightarrow \infty} 2 \left(1 + \frac{\sigma_{p3}}{\sigma_{p2}} \right) \quad (3-1)$$

で表される。表 2-3 より $\sigma_{p3}/\sigma_{p2} = 3.05 \times 10^{-3}$ 程度であるため、 $NF_{\min} = 3.02$ dB であり、ほぼ量子限界 3 dB となると考えられていた[4]。しかしながら、今回の計算で 3.1 ~ 3.5 dB 程度になることが判明した。この理由は、物理的には以下のように考えられる。図 3-3 のスペクトル a に Tm ファイバ内の局所反転分布率（第 2 章(2-37)式参照）の長手方向依存性の計算結果を示す。ただし励起パワー 250 mW、信号波長 1470 nm とした。このときの平均反転分布率 ΔN は 0.993 であり、入射端付近でも同程度の値である。この反転分布率 0.993 という値は 1 に極めて近く、4 準位動作を裏付けるものである。しかし逆に言うと、レーザ下準位 $^3\text{H}_4$ に 0.7% ほど分布していることになり、これが雑音指数の僅かな劣化を起すと考えられる。

また、このときのツリウムイオンの利用効率 η_u は次式で定義される。

$$\eta_u = \frac{1}{L_0} \int_0^L \frac{N_1(z) + N_3(z)}{N_t} dz \quad (3-2)$$

計算の結果、 $\eta_u = 0.19$ つまり 19% の Tm イオンが信号増幅に関与していることも判明した。第 2 章の議論から EDFA においては、信号増幅に寄与する Er イオン数の間には常に $N_0 + N_1 = N_t$ の関係があるため、利用効率は常に 100% である。これに対し TDFA では約 20% と、かなり低いと言える。またこの利用効率は、励起光、信号光の波長、それぞれのパワーの関数でもある。一般的には増幅器の飽和が強い場合、すなわち励起パワーに比較し信号パワーが大きい場合、利用効率は高くなることが予想され、計算でも確認している。

3.2.2 低雑音励起 (1.05 μm /1.56 μm) 利得シフト TDFA

次に本研究の主題である 2 波長 (1.05 μm /1.56 μm) を用いた低雑音励起について、利得、雑音指数および反転分布の振る舞いを計算した。図 3-2 (c), (d) に利得と雑音指数のファイバ位置依存性を示す。図 3-2 (a), (b) と異なり、励起パワーに応じて最適ファイバ長が存在することがはっきりと分かる。特に励起パワーが低いときには、より短い Tm ファイバ (およそ 10 m) で急峻に最大利得に到達し、その後減少に転じている。これは 3 準位系である EDFA

と定性的に同じ傾向である。雑音指数は、およそ 3 dB が得られた。

次に、低雑音励起 TDFA における反転分布率のファイバ位置依存性を図 3-3 のスペクトル b に示す。励起パワーは $1.05\ \mu\text{m}=300\ \text{mW}$ 、 $1.56\ \mu\text{m}=20\ \text{mW}$ とした。信号波長 $1470\ \text{nm}$ とした。このとき反転分布率は当初 0.92 程度であったものが、ファイバの中間を越えると、0.4 程度にまで低下している。ファイバ全体では平均 0.754 であった。この計算結果は、 $1.56\ \mu\text{m}$ 励起により平均反転分布率が低減するという、第 2 章 2.3.3 節に述べた本方式の着想を定量的に裏付けるものでもある。また Tm イオン利用効率は 0.50 (50%) であり、上記の $1.05\ \mu\text{m}$ 励起 TDFA に比べ、約 2.5 倍の高効率化が実現できた。つまり同節にて述べた、 $1.56\ \mu\text{m}$ 励起の第 2 の役割である利得増強効果も、計算上で確かめることができた。このことが利得特性における、本励起方式の優位性を生み出している。

3.3 実験構成

本節以降では低雑音励起方式を実際に適用することで、利得シフト TDFA の利得、雑音指数などの増幅特性を実験的に明らかにするとともに、利得シフト効果の発現を確認する。また実験結果を理論計算と比較し、理論計算自身の妥当性を検証するとともに、その物理的な意味を考察する。

図 3-4 に利得シフト TDFA の構成例を示す。第 1 励起光 $1.05\ \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起光として、半導体レーザ (LD) 励起イッテルピウム (Yb) 添加ファイバレーザ (IRE ポ

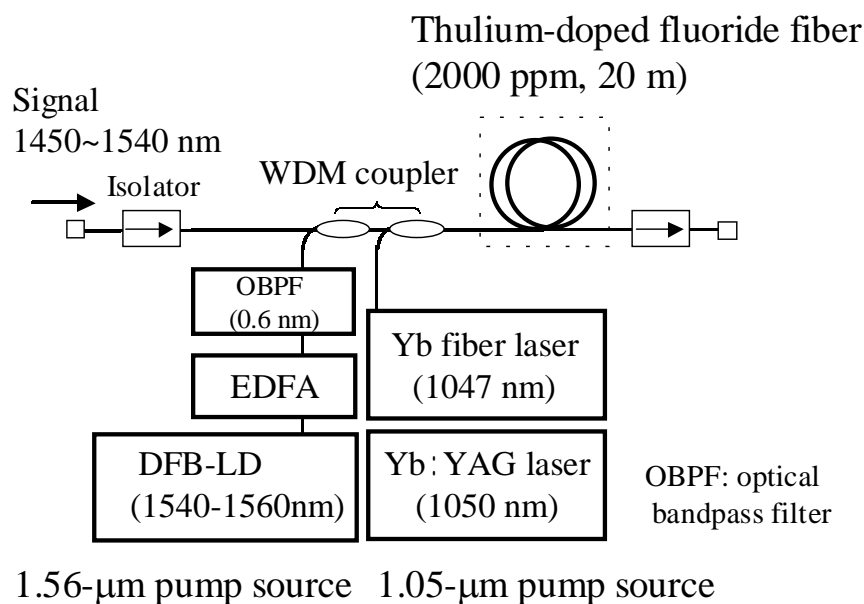


図 3-4 実験に用いた低雑音励起方式利得シフト TDFA の構成例

ーラス社製、YLM-1047-500、定格出力 500 mW、波長 1047 nm) を用いた。ファイバレーザは、従来の LD 励起固体レーザ (Nd:YLF や Nd:YAG) よりも堅牢で高効率という特徴を有する。また 3.7 節で述べるが、本研究にて新たに開発した 1.05 μm 帯の超小型励起光源である LD 励起 Yb:YAG レーザも用いた。Yb:YAG レーザの発振波長は 1050 nm であり、TDFA の吸収スペクトルから 1047 nm で励起した場合と励起効率や増幅特性はほとんど変わらないことが予想される。予備実験を行った結果、確かにほぼ同等の利得特性であることが確認された。

第 2 励起光の 1.56 μm 励起光として DFB レーザを EDFA により増幅した出力光を用いた。予備実験の結果、1540~1560 nm の波長範囲内で、増幅特性はほぼ同一であった。これは、 $^3\text{H}_6$ \rightarrow $^3\text{H}_4$ 吸収遷移が広帯域であることに起因する。また出力パワーレベルとして 100 mW 以下で十分であった。これらのことにより、3.6 節で述べる伝送実験用試作装置において、比較的レーザ発振線幅の広いファブリーペロ型 1.56 μm 半導体レーザを適用することが可能であった。

これらの励起光を Tm ファイバへ入射するために、ファイバ融着型の波長多重プラ (タツタ電線製) を用いた。より広帯域でかつ低損失な特性を有する誘電体多層膜フィルタを用いることももちろん可能であるが、今回は作製の容易な融着型を用いた。

ツリウムファイバとして Zr ベース・フッ化物ガラス (ZBLAN) をホストガラスとし、Tm 添加濃度 2000 ppm (重量比)、ファイバ長 20 m、比屈折率差 = 3.7% (NTT エレクトロニクス社製) のものを用いた。ファイバパラメータは第 2 章の表 2-3 に示してある。このツリウムファイバは湿度や応力等に耐えるため、気密封止モジュール内 (120×120×9 mm³) に実装され、石英ファイバ (Corning 社 Flexcor1060、波長 1 μm 用シングルモードファイバ) が外部へのピグテイルとして接続されている。

波長可変光源からの信号光 (パワー -30 dBm) を TDFA に入射し、波長走引することで、利得・雑音指数を測定した。利得、雑音指数は、光スペクトルアナライザを用い、第 2 章章(2-10)式、(2-11)式により算出した。ASE 補間法を用い [7]、信号近傍の ASE 光から信号に埋もれた ASE 光パワー (雑音パワー) を推定している。この手法の測定精度はおよそ 0.2 dB であると推定される。(付録 B 参照)。また波長多重信号増幅を模擬する場合、1 波ないし 16 波程度の波長多重信号を飽和信号として TDFA に入射し、増幅器への総入力信号パワーを規定した上で、小信号光を波長走引した。ただし小信号とは、ファイバ増幅器中の反転分布を乱さない程度に弱いパワー (～ -30 dBm) の信号を指す。ファイバ増幅器の動作特性は総入力信号パワーに対し敏感に変動するため、この手法を用いることで動作点を固定できる。これを反転分布固定法 (Locked inversion 法) と言う [8]。

表 3-1 に実験に用いた光源（信号光源、飽和信号、第 1 励起光源、第 2 励起光源）とツリウム添加ファイバの仕様を示す。

3.4 増幅特性と考察

3.4.1 増幅自然放出光の長波シフト

本低雑音励起方式の利得特性を調べる前に、ASE 光の挙動を観察した。ASE スペクトルは、入力信号パワーが極限的に小さいときの小信号利得スペクトルと同等であると考えられ、最も簡易に利得の挙動を推測する手段である。

図 3-5 に ASE スペクトルを示す。ここでは波長多重信号増幅を想定し、反転分布固定のための飽和信号（波長 1460 nm、信号光パワー 0 dBm）を入射している。1.05 μm 励起光のみを入射した場合（スペクトル a：第 1 励起光 1.05 μm パワー 140 mW、b：同 200 mW）ASE スペクトルは相似形のままで、励起パワーを増大してもピーク値は 1470 nm 付近にある。一方、a の状態に加え、第 2 励起光 1.56 μm を 30 mW 入射した場合の ASE スペクトルは c のようになり、1485 nm 近辺に ASE ピークが長波シフトした形状を呈した。

これらの実験結果は、ASE スペクトルを 1.56 μm 励起光により制御できることを示していると同時に、ひいては利得スペクトルをも制御できる可能性を強く示唆している。この結果を受け、次の増幅特性の把握に移る。

表 3-1 利得シフト TDFA 実験用の光源とファイバの仕様

光源/ ファイバ	種類	メーカー	波長 [nm]	最大出力
信号光源	波長可変半導体レーザ	サンテック	1450 ~ 1540	+5 dBm
飽和信号	<ul style="list-style-type: none"> 波長可変半導体レーザ DFB レーザ 	Agilent NEC	1450 ~ 1510	+5 dBm
第 1 励起光	<ul style="list-style-type: none"> LD 励起 Yb ファイバレーザ Yb:YAG レーザ (3.7 節参照) 	IRE-Polus NEC	1047 1050	500 mW 3 W
第 2 励起光	<ul style="list-style-type: none"> DFB-LD + EDFA 	NEC	1540 ~ 1560	100 mW
増幅ファイバ	Tm 添加フッ化物ファイバ	NTT エレク トロニクス	-	-

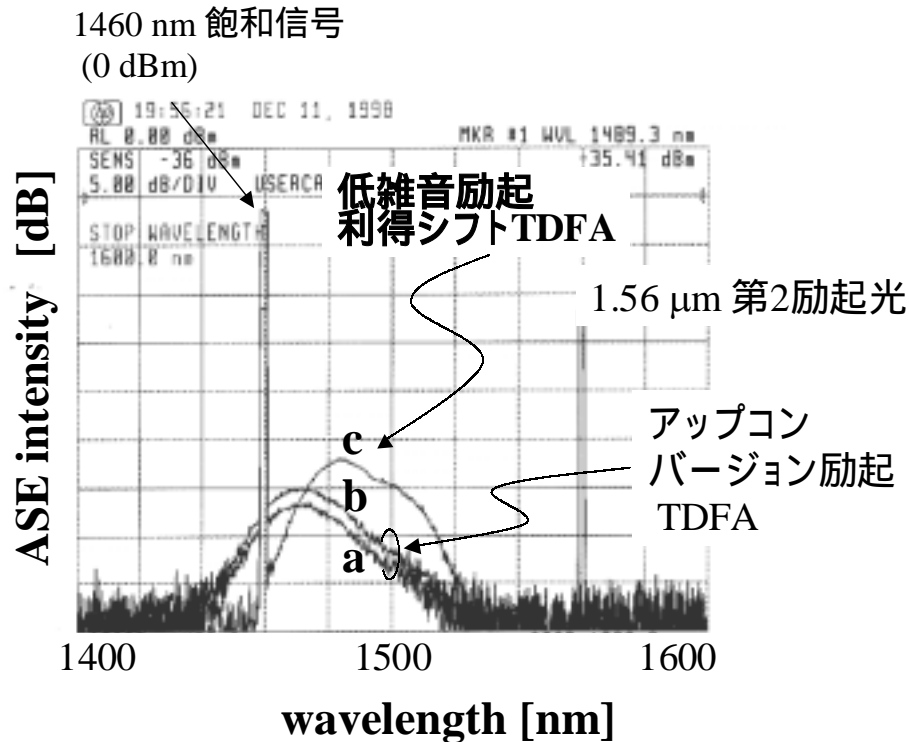


図 3-5 低雑音励起における ASE スペクトルの長波シフト

3.4.2 基本増幅特性

3.4.2.1 増幅器構成

低雑音励起方式 TDFA の動作特性を詳細に調べるために、理論的にも把握しやすい、最も基本的な構成で測定を行うこととした。特に、利得・雑音指数などが、励起パワーや信号パワー、信号波長によりどのように変化するかを把握する。そこで図 3-4 に示すように Tm ファイバ長 20 m を用い、2 波長前方励起の増幅器を構成した。この構成で利得、雑音指数、飽和特性などの基本的な振る舞いを明らかにしておく。ここで行った実験により、次節 3.4.3 節以降において、実用的な高利得かつ低雑音利得シフト TDFA の構成が発案される。

3.4.2.2 利得、雑音指数の波長依存性

利得と雑音指数の波長依存性を測定した。信号入力パワーは -30 dBm とした。図 3-6 に測定結果を示す。図 3-6 中のスペクトル a は第 1 励起光の励起パワー 110 mW における従来型 1.05 μm (ここでは 1047 nm) アップコンバージョン励起 TDFA の利得スペクトルを示している。NTT や BT の報告と一致して、波長 1460 nm にピークを持つ単峰プロファイルである。利得最大値は 1465 nm において約 22 dB である。

ここで第 1 励起光 1.05 μm パワーを 110 mW 固定とし、スペクトル a の状態に加え、第 2 励起光 1.56 μm を入射した場合のスペクトルを b~d に示す。第 2 励起光パワーとして、b: 12 mW、c: 20 mW、d: 35.3 mW を入射している。

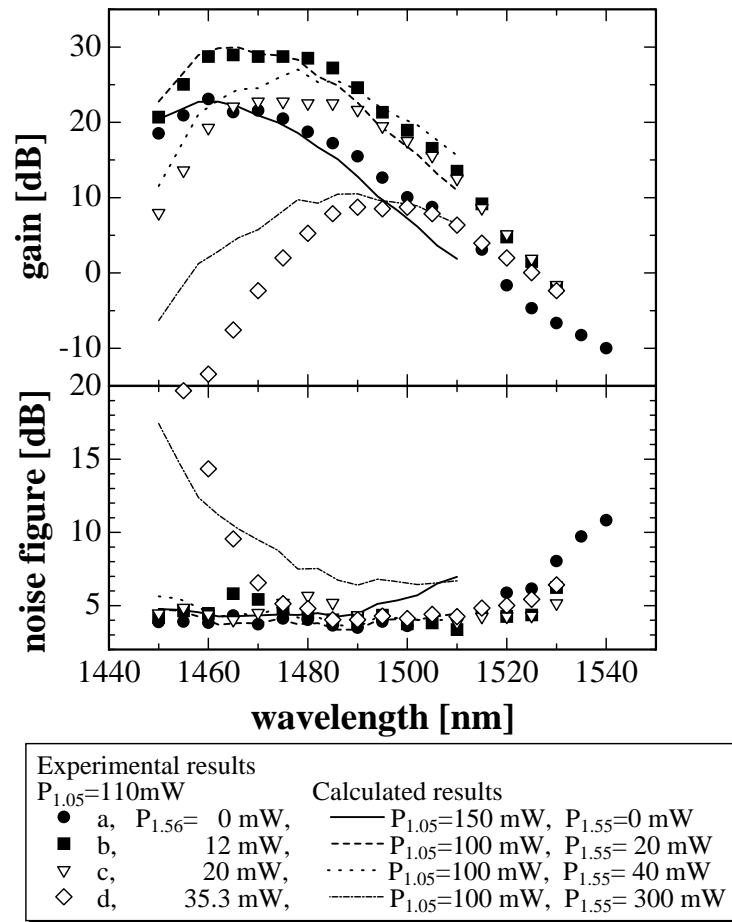


図 3-6 利得および雑音指数の波長依存性 (Tm ファイバ長 20 m)

これらのスペクトルを比較すると、以下の 3 段階に分けられる。

(1) 第 2 励起光パワー $\leq 12\text{mW}$; 利得増強 : スペクトル a と b を比較する。b では第 2 励起光による利得スペクトルの長波シフトよりも、測定帯域全体での利得増大が表れている。1460~1520 nm まで利得がおおよそ 5~8dB 増大していることが分かる。これは 1.56 μm 光により下準位生成が効率よく行われ、Tm ファイバ中の反転分布が強められていることを示している。1.56 μm と 1.05 μm の吸収断面積比は、おおよそ $\sigma_{P4} : \sigma_{P1}=18:1$ であることを考慮すると (第 2 章表 2-3 参照)、このスペクトル b の状態においては、下準位生成に関わる励起光は、アップコンバージョンの第 1 段階が支配的な状態から、1.56 μm 光が 1.05 μm 光と同程度の寄与を成す状態へと移行していると解釈できる。

(2) 12 mW < 第 2 励起光パワー < 20 mW ; 短波側利得抑圧+平坦化 : スペクトル c では a

と b に比べ、短波側利得が抑圧され、長波側に利得ピークがシフトしている。同時に 1465 ~ 1490 nm に渡り利得が平坦化している。

(3) 第 2 励起光パワー > 20 mW ; 利得減少 + 1495nm への長波シフト : d では、最大利得は小さいものの (9 dB 程度) 利得ピーク波長は 1495 nm へと大幅に長波シフトしている。また 1480 ~ 1500 nm 帯域で平坦な利得を呈する。この状態では、1.56 μ m 光が下準位生成において支配的となり、今度は 1.05 μ m アップコンバージョン励起の第 2 段階と競合し始め、反転分布率を低減させる状態に移行する。反転分布率が減少し、ピーク波長が長波側へとシフトしながら、利得値も低減していく。

なお全スペクトルにおいて、雑音指数は、正の利得を呈している波長領域で、5 dB 以下であった。この雑音指数は、利得シフト TDFA の入力部分の結合損失 1 dB を含むため、TDFA 単体の雑音指数は 4 dB 程度である。

次に計算結果との比較を行う。実線、破線などは実験とほぼ同一条件で計算を行った結果である。まず 1.05 μ m アップコンバージョン励起 TDFA において、励起パワーを調整することで、実験結果 (スペクトル a) と計算結果 (実線) は利得ピーク値、ピーク波長、プロファイルなどで非常に良い一致を見た。すなわち、1.05 μ m アップコンバージョン励起 TDFA の動作を精度よく正確に記述することができた。長波長側で計算値のほうが実験値より少し低くなっているが、これは計算に用いている誘導放出断面積プロファイルの数値精度が低いことに起因するものと考えている。

次に、低雑音励起利得シフト TDFA の計算結果を、破線 (スペクトル b)、点線 (スペクトル c)、一点鎖線 (スペクトル d) にて示す。計算と実験とは、ほぼ同様の傾向を示し、比較的良い一致を見た。ただし、このとき 1.56 μ m 励起パワーの調整を加えている。この理由は、上記と同様に計算に用いた遷移断面積の値の精度不足、および数値モデルに取り入れていない不均一広がりによって起因していると考えている。正確な数値計算には、より正確な断面積プロファイルおよび不均一広がり幅の同定が必要である。

またそれぞれの平均反転分布率は、実線 : 0.989、破線 : 0.631、点線 : 0.555、一点鎖線 : 0.422 であった。当初 1 に極めて近い高い反転分布率であったものが、第 2 励起光 1.56 μ m のパワーを増大させていくと、徐々に低減していくことが明らかに分かる。またスペクトル d では、第 2 章で述べた利得シフトの必要条件である反転分布率 0.4 に近い状態が実現できていることも分かる。ただし、利得ピーク値が低いため、利得向上の施策を施す必要がある (3.4.3 節にて述べる)。

なおスペクトル $d(\diamond)$ では、利得ピーク値を低下させる要因として、波長 800 nm と 1800 nm の ASE 光発生が計算上、不可欠であることも判明した。すなわち 2.3.4 節のレート方程式において、これらの光波が存在しないとしたとき、1.56 μm 励起光をどれだけ増大させても、利得ピーク値は低減しないという計算結果であった。実際には、これらの ASE 光を観測出来ていないが、おそらく T_m ファイバ中にて発生しているものと考えている。

雑音指数の信号波長依存性も同図に示す。比較的合致しているのが見て取れる。計算値では、単体 TDFA の雑音指数に入力結合分 1 dB を加えている。利得シフト状態（一点鎖線）では、短波側（1450 ~ 1470 nm）で雑音指数が増大している様子も再現できている。

3.4.2.3 利得、雑音指数の入力信号パワー依存性

図 3-7 に 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA の利得、雑音指数の出力（入力）信号パワー依存性 [(a) : 実験結果、(b) : 計算結果] を示す。これは飽和特性とも呼ばれ、ファイバ増幅器から抽出できる最大出力と利得・雑音指数の関係を一目で把握でき、伝送システムへの適用の際に、重要な設計指針となる。

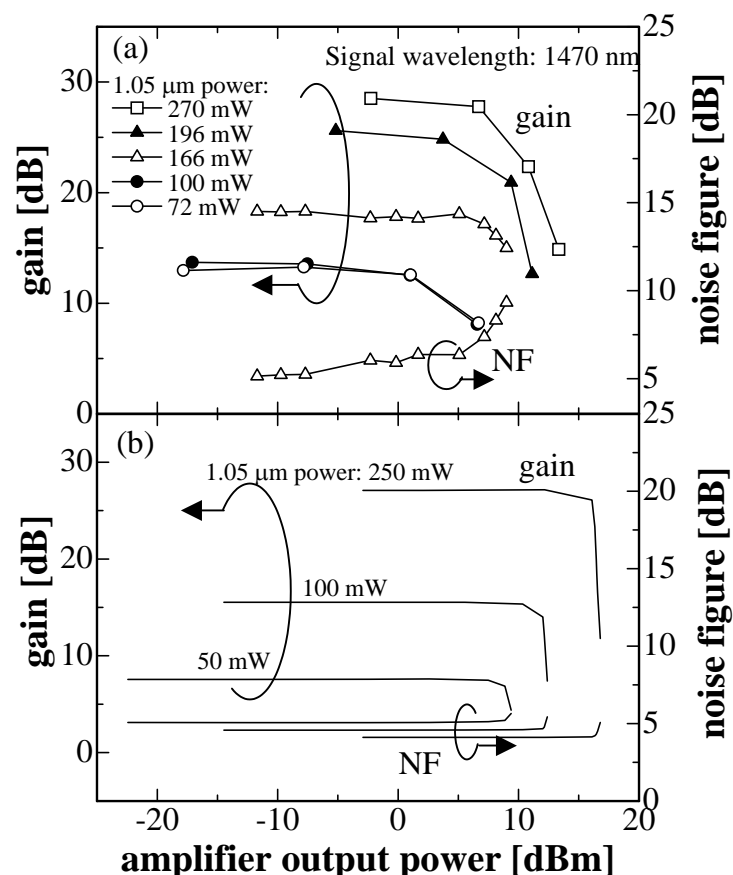


図 3-7 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA の利得、雑音指数の増幅器出力依存性

図 3-4 と同様の増幅器構成を用いた。実験では励起パワーを上げるにつれ、高利得のため信号パワーの低い領域でレーザ発振が始まった。このためグラフ(a)の左上の部分（増幅器出力が小さく、利得が大きい部分）の利得測定が困難で、データが欠落している。

図 3-7 (a)より、増幅器出力が小さい場合、利得は一定であることが分かる。これが小信号状態に相当する。そして増幅器が飽和するにつれ利得が徐々に下がっていく、と同時に雑音指数が増大する。この特性は EDFA を含むほぼ全ての可飽和増幅器に共通のものである。利得が小信号から 3 dB 低下する出力パワーを「飽和出力」といい、増幅器の出力指標である。励起パワー 270 mW で飽和出力は +8 dBm であった。また励起パワーを 72 mW から 270 mW へと増大した場合、飽和出力は +5 dBm から +8 dBm へと若干増大する。これは小向等の報告[4]と同様の結果である。この理由は定性的には、以下のように考えられる。TDFA は 4 準位系でかつ自己終端系であるため、励起パワーが低い時には信号出力も低く、下準位数はほぼ零とみなせる。このため下準位寿命の短い 4 準位系と同様（例えば Nd 添加ファイバ増幅器）、飽和出力一定の動作をすると考えられる[9, 10]。しかし励起パワーが高いときに、信号入力を増大していくと、信号出力も増大していき、アップコンバージョン励起といえども僅かに下準位にも Tm イオンが蓄積し始める。この状態は、EDFA などの 3 準位動作に僅かに近づいていくことを示している。従来型 TDFA はこのように、通常の小信号動作ではほぼ 4 準位系とみなせるが、飽和動作に近づくにつれ、3 準位系に僅かに近づいて来るものと考えられる。

さらに定量的に説明を加える。ASE 光を無視すると、3 準位系増幅器の利得と入力信号パワーの関係は以下のように解析的に書ける。なお ASE 光を無視しているので、下式の適用範囲は低利得（<20 dB）に限られることに注意されたい。

$$G(I_s) = \frac{g_0}{1 + I_s / I_{sat}} \quad (3-3)$$

$$I_{sat} = \frac{h\nu_s}{2\sigma_{sa}\tau} (I_p + 1) \quad (3 \text{ 準位系の飽和強度}) \quad (3-4)$$

$$g_0 = \sigma_{se} N_t \quad (\text{小信号利得}) \quad (3-5)$$

ただし、 $I_p = P_p / \pi A_{eff}^2$: 励起強度、 $I_s = P_s / \pi A_{eff}^2$: 信号強度である。すなわち(3-4)式から飽和出力（飽和強度）は励起パワー（励起強度）に比例することが分かる。一方、4 準位系では、飽和強度は一義的に定まり、

$$I_{sat} = \frac{h\nu_s}{\sigma_{sa}\tau} \quad (4 \text{ 準位系の飽和強度}) \quad (3-6)$$

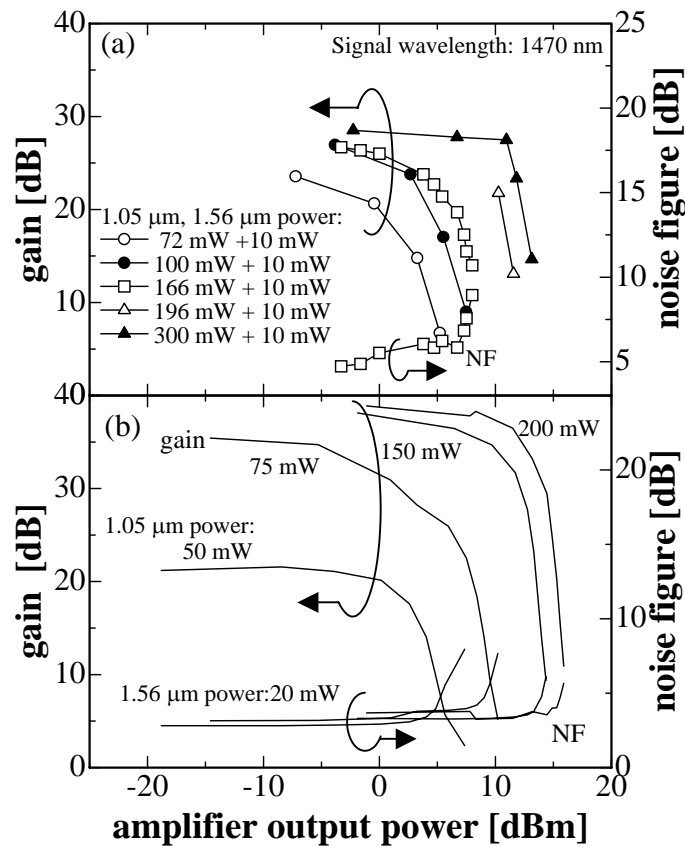


図 3-8 低雑音励起利得シフト TDFA の利得、雑音指数の増幅器出力依存性

となり、励起パワーに無関係になる。これらは 3 準位系増幅器および 4 準位系増幅器の特徴的な振る舞いを現している。

図 3-7 (b)には、数値モデルによる計算結果も示している。飽和出力が励起パワーの増大に伴い、若干増大する様子などの全体的な傾向は合致している。励起パワー 250 mW での飽和出力の計算結果は +15 dBm 程度となっており、計算の方が実験値 (+8 dBm) より大きい。乖離の理由は明らかではないが、数値モデルに入っていない不均一広がりの影響が疑わしいと考えている。雑音指数は、小信号時から入力信号パワーを増大させるにつれ、徐々に増大していく様子も再現できている。これは反転分布率が低減していくためで、増幅器特性として妥当である。反転分布率については、励起パワー 250 mW において小信号 (-30 dBm 入力) で 0.993、飽和状態 (0 dBm 入力) で 0.712 であり、僅かに 3 準位的な振る舞いを示す理由もここにある。Tm イオン利用効率は飽和状態で 0.295 であった。

次に図 3-8 に低雑音励起利得シフト TDFA での利得、雑音指数の出力信号パワー依存性 [(a): 実験結果、(b): 計算結果] を示す。図 3-7 と比較すると、励起パワーの増大に伴い、

飽和出力も大きく増加することが見て取れる。実験では励起パワー300 mW (1.05 μ m)、10 mW (1.56 μ m)において飽和出力+12 dBm が得られた。雑音指数は、小信号状態から少しずつ上昇し、飽和が始まると急激に増大することが分かる。これは低雑音励起により、下準位数密度が増大し、3 準位系に極めて近くなっているためと考えられる。計算[同図 (b)]でも同様の傾向を確認した。励起パワー200 mW (1.05 μ m)、20 mW (1.56 μ m)、小信号入力 -30 dBm において、平均反転分布率 0.76、Tm イオン利用効率 0.43 を得た。

3.4.2.4 利得、雑音指数の励起パワー依存性

図 3-9 に利得と雑音指数の励起パワー依存性を示す。信号パワーを-30 dBm とした。白丸や四角などが実験結果、実線や破線が計算結果である。1.05 μ m アップコンバージョン励起 (1.56 μ m パワー=0 mW) の場合、波長 1470 nm の利得の実験結果()と計算結果(実線)は非常によく一致している(偏差<0.5 dB)。この理由は付録 A に示すように、数値計算に用いた TDFA の物性定数を十分に注意深く決定したためと考えられる。励起効率(利得の励起波長に対する微係数)で 0.13 dB/mW を得た。波長 1510 nm の実験結果(+)と計算結果(破線)では、若干計算結果の方が低く出ているものの、ほぼ合致している。これは文献[4, 11]と合致する。一方、雑音指数についても実験と理論は概ね合致していることが見て取れる。ただし TDFA の入力部の結合損 1 dB を計算値に加えている。

次に低雑音励起 TDFA の計算結果について述べる。図 3-9 中の白丸が 1.56 μ m パワーが 10 mW のときの実験結果(波長 1470 nm)であり、一点鎖線が計算結果(ただし 1.56 μ m パワーを 20 mW とした)である。実験では励起効率 0.2 dB/mW を得て、1.05 μ m 励起よりも 1.5 倍に励起効率が上昇している。計算と実験では、利得の絶対値としては 5 dB 程度の差があるが、傾向としてはおおむね合致していると考えている。特に 1.56 μ m パワーを加えることで、利得が増強されている様子が再現できている。また雑音指数は 1.05 μ m 励起 TDFA とほぼ同程度か、むしろ良くなる。1.56 μ m 励起によりファイバの入射端部分の利得がより高められるためと考えられる。

3.4.3 単一信号増幅における利得シフト動作特性

3.4.3.1 最適構成の検討

以上の基本特性を受け、特に光前置増幅器に適した高利得・低雑音利得シフト TDFA を構築する。3.4.2.2 節において述べたように、Tm ファイバ長 20 m を用い、波長 1.49 μ m へ長波シフトした場合、最大利得はおおよそ 9 dB であった。第 2 章で述べたように、利得シフト動作の場合、単位長さあたりの利得が低下するためである。ファイバ増幅器が飽和する

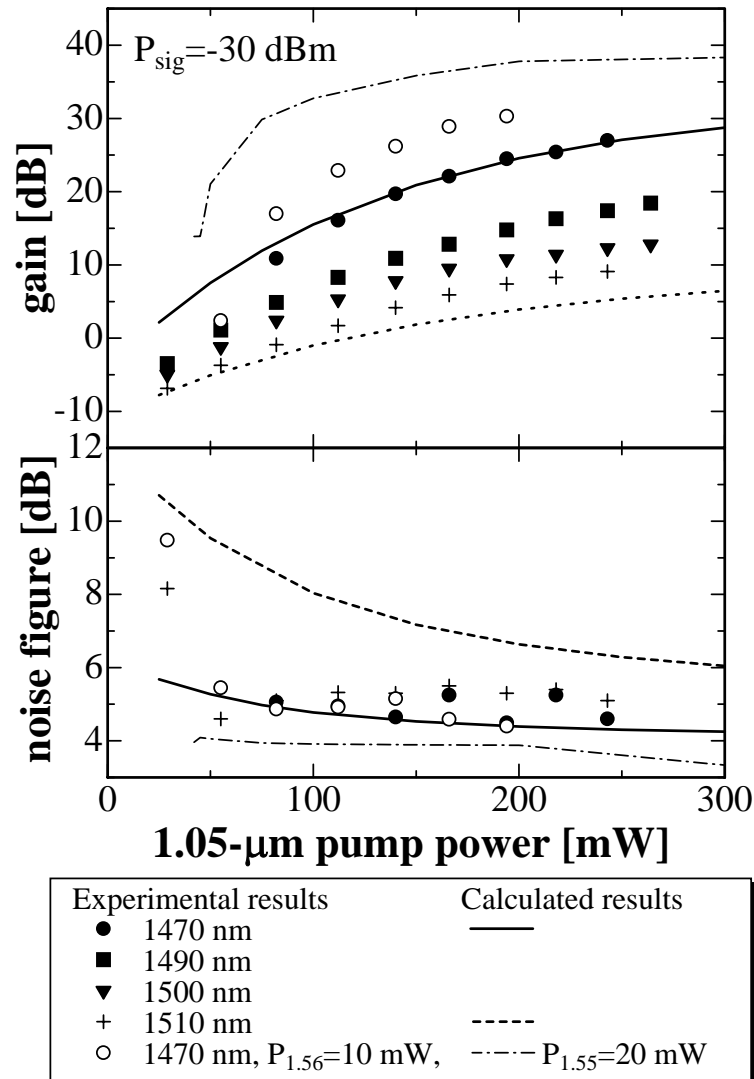


図 3-9 利得、雑音指数の励起パワー依存性 (Tm ファイバ長 20 m)

までは、利得とファイバ長はほぼ比例すると考えて良いことを考慮すると、小信号増幅において高利得 (~ 30 dB) の実用的な増幅器を構成するには、およそ 3 倍の長さ (60 m) が必要であることが分かる。ただし単にファイバ長を伸長するのではなく、ファイバの中間点 (ちょうど 1/2 で無くともよい) において、励起パワーを供給する構成とした。この理由は、TDFA が基本的には 4 準位系であるため、励起パワーの枯渇した地点では下準位にイオン数が存在せず、したがって反転分布も形成できないためである。図 3-10 (a), (b) にその状況を模式的に説明する。同図(a)に 1 段構成 Tm ファイバ中の反転分布の挙動を示す。と同時に、ファイバ長を単純に伸長した場合の利得スペクトルの計算値および実験結果を示す。Tm ファイバの中間地点では反転分布率は低下するが、励起パワーも徐々に減衰し、後半で

は、ほとんど励起されない状況になると考察できる。10 m から 40 m へ Tm ファイバ長を伸長しても、利得シフトは起こらないことが計算結果、実験結果の双方から分かる。実験結果では内部損失などの影響で、40 m ファイバは 20 m ファイバより利得が出ていない。

一方、同図(b)では、Tm ファイバの中間に励起パワーを供給することで、Tm ファイバの後半部分でも、レーザ下準位 3H_4 、レーザ上準位 3F_4 に適切に Tm イオンを供給することが出来ることを模式的に示している。これらの考察を受け、図 3-11 に示す構成の 2 段構成を採用した。これは通常、EDFA で行われているような増幅器出力パワーを稼ぐための 2 段構成とは意味合いが異なり、利得シフト動作に本質的に不可欠である。

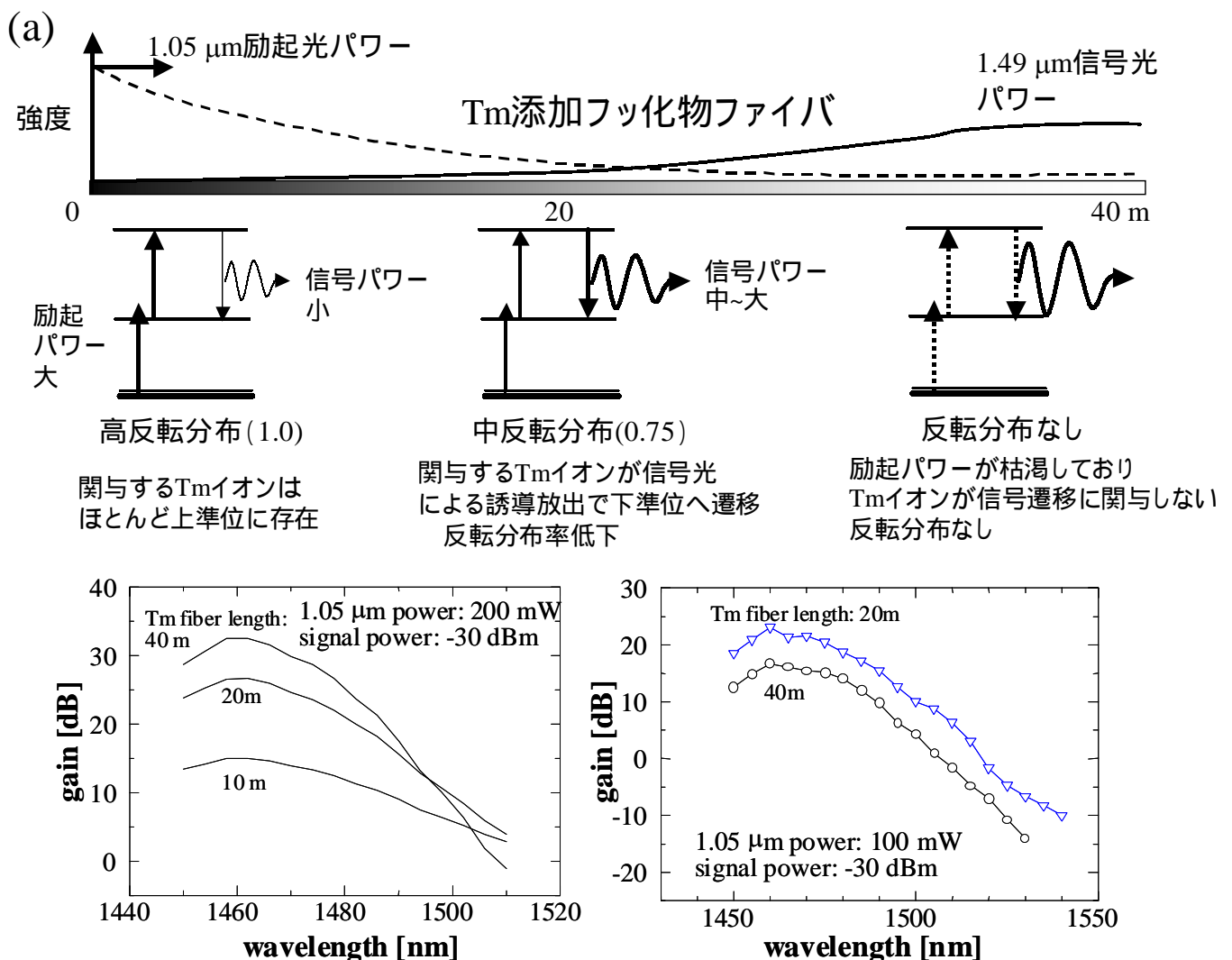


図 3-10 (a) 1 段構成 TDEFA の反転分布の挙動 (上)

利得スペクトルのファイバ長依存性 (下) 左: 計算結果、右: 実験結果

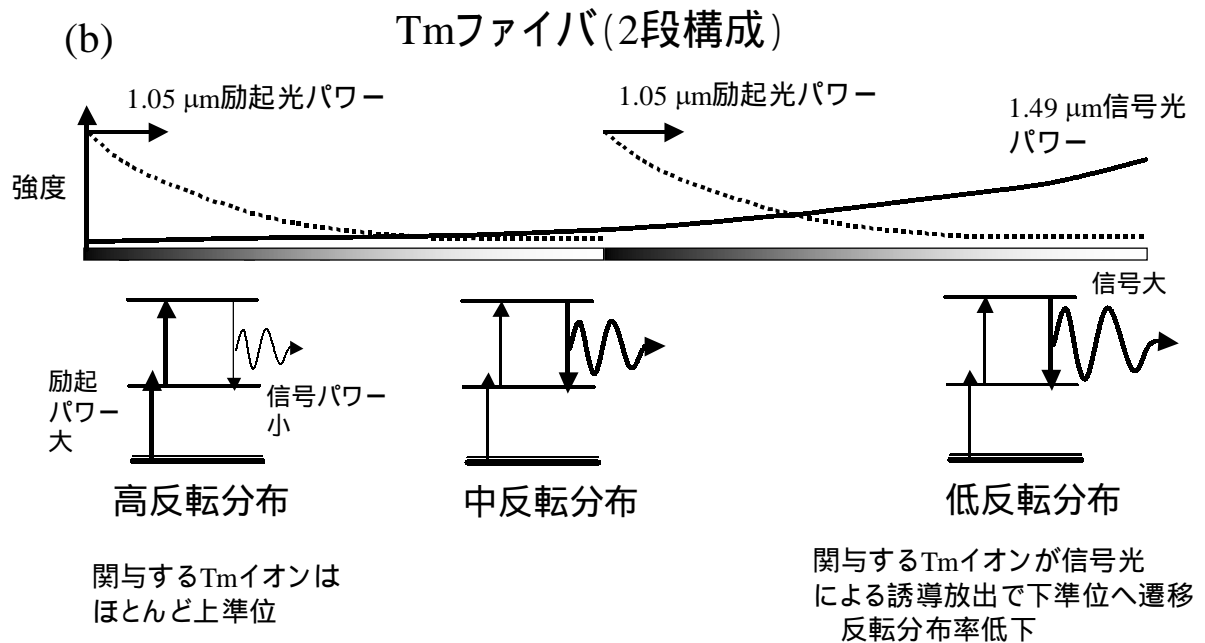


図 3-10 (b) 2 段構成 TDFA の反転分布の挙動

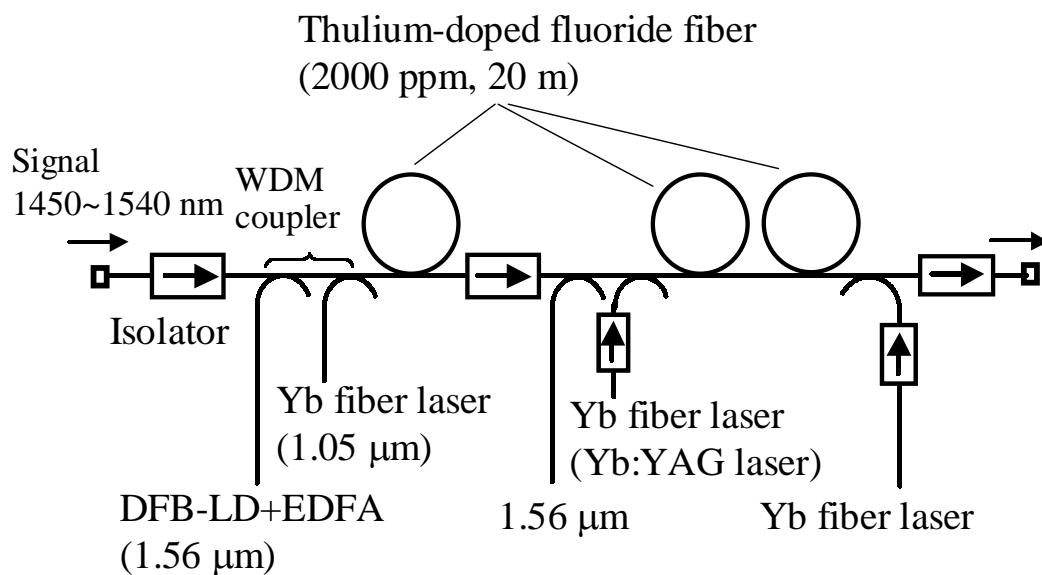


図 3-11 2 段構成 高利得・低雑音利得シフト TDFA の構成図

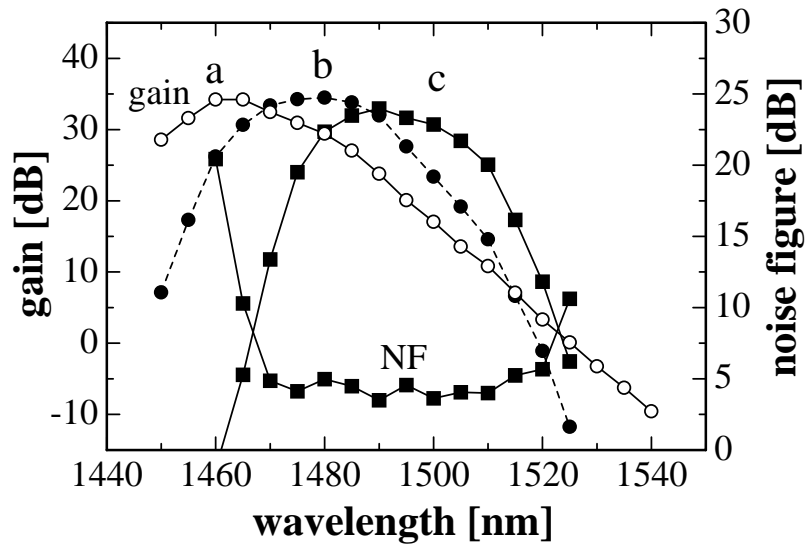


図 3-12 2 段構成利得シフト TDFA の利得、雑音指数スペクトル

3.4.3.2 低雑音、高利得の利得シフト動作特性

図 3-11 の増幅器構成を用いたときの、信号入力パワー-30 dBm における、利得および雑音指数スペクトルの実験結果を図 3-12 に示す。スペクトル c に示すように、1475 ~ 1510 nm 帯域に利得 > 25 dB、NF < 5 dB の高利得・低雑音増幅動作を実現した。このときの励起光パワーは、1.05 μm は 330 mW (前段) 395 mW (後段) 1.56 μm は 42 mW (前段) 29 mW (後段) であった。ただし、図 3-11 における後段後方よりの 1.05 μm アップコンバージョン励起パワーは零としている。参考のために 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA (ファイバ長 20 m) の利得スペクトルをスペクトル a に示す(励起パワー 300 mW)。スペクトル c は a に対し、30 nm ほど長波側にシフトしていることが分かる。

本研究で開発された LD 励起 Yb:YAG レーザを用いて図 3-12 を得たが、使用には何ら問題はなかった。これは Yb:YAG レーザ波長を TDFA 励起用に適切な 1.05 μm に調整し、十分なレーザ出力 (> 3 W) を得ていたためである。

またファイバ長 60 m、2 段構成での 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA の利得スペクトルをスペクトル b に示す。これは図 3-11 で第 2 励起光パワーを零にした場合である。利得ピークは 1480 nm に存在する。この場合、2 波長励起を行っていないにも関わらず、多少の利得シフトを観測した。この理由は、2 段構成の場合、L バンド EDFA と同様、前段で発生した 1.47 μm 帯 ASE 光が後段の反転分布率を低下させると言う動作機構が適用できるためと考えられる (図 3-10 (b))。しかしスペクトル c ほどの利得シフトは得られない。

ここで前段部分の励起条件について一言触れておく。前段部分では 1.05 μm と 1.56 μm

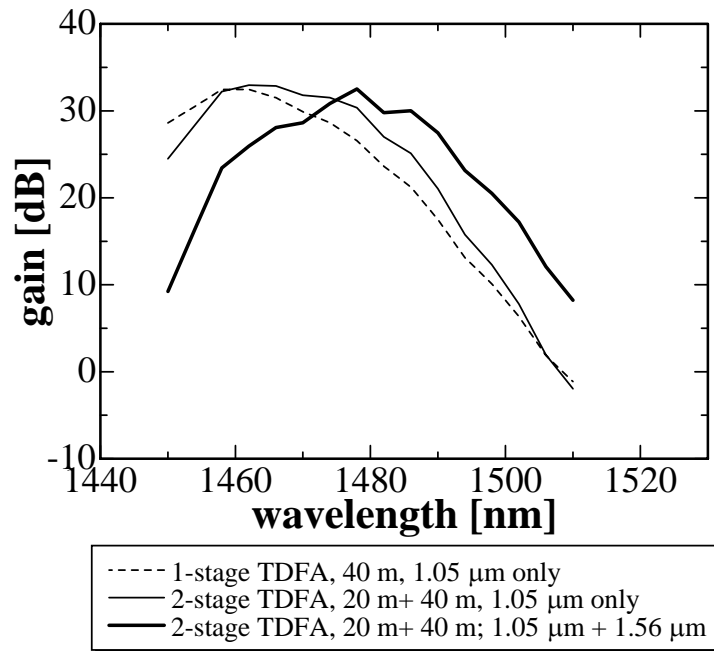


図 3-13 2 段構成 高利得・低雑音利得シフト TDFA の利得スペクトル（計算結果）

の励起パワー比率はおよそ 13%で、図 3-6 のスペクトル b に相当する反転分布状態である。しかし、利得シフト TDFA 出力（図 3-12 のスペクトル c）は、図 3-6 のスペクトル b より大きく長波シフトしている。これはツリウムモジュール 3 個縦列接続を 60m の一本のファイバと考えたとき、利得スペクトルがシフトしながら後段部分に伝搬し、さらに反転分布率を低減させていると解釈できる。そのため後段部分の第 1 励起光に対する第 2 励起光の寄与度（ $29 \text{ mW}/395 \text{ mW}$ ）=7.3%が、前段部分よりも少なく済んでいる。

これらのことを理論的に確かめるため、2 段構成 TDFA の計算を行った。図 3-13 に 2 段構成利得シフト TDFA の利得スペクトルの計算結果を示す。破線は 1 段構成 40 m 長の Tm ファイバである。2 段構成を取ることで、 $1.05 \mu\text{m}$ アップコンバージョン励起においても僅かに利得がシフトすることがはっきりと分かる（細実線）。さらに $1.56 \mu\text{m}$ を加えることで、さらに利得が長波へシフトしていく様子（太実線）が計算で再現でき、上記の考察が正しいものと考えられる。

3.4.4 波長多重信号増幅における利得シフト動作特性

3.4.4.1 最適構成の検討

中継増幅器や一括増幅器に適用される波長多重信号増幅においても、図 3-11 の構成を採用した。ただしこのとき以下の注意が必要であった。すなわち Yb ファイバレーザは、相互

注入あるいは反射戻り光による強度変動を受けやすい。このため双方向励起を行う場合、十分なアイソレーションが必要である。励起レーザに組み込むアイソレータとしては、励起レーザ出力の散逸を避けるため、出来る限り低損失なものが要求される。市販（OFR 社）の偏光無依存型アイソレータの損失は、およそ 1.5 dB と大きく使用に適さない。そこで本研究ではトーキン（株）に依頼し、アイソレータを新規開発した。このアイソレータは、低損失（<1 dB、典型値 0.7 dB）、高アイソレーション（>20 dB、典型値 25 ~ 35 dB）であり、市販品の約 1/2 の損失である。

2 段構成の前段部分は 2 波長前方励起、後段部分は 2 波長前方励起と 1 波長（1.05 μm アップコンバージョン光源）による後方励起とした。この点が単一信号増幅の場合と異なる。この構成により、前段部分で高利得・低雑音を維持し、後段側で波長多重伝送に必要な高出力（+20 dBm 級）と高効率を達成することができる。

この構成を最終的に選択するに際し、多数のファイバ増幅器構成を試行した。ファイバ増幅器の構成として、1 段/2 段構成、前方/後方、1 波長/2 波長励起の種別の組み合わせを考慮すると、非常に多数の選択肢が存在する。全数について試行することは出来なかったが、およそ 20 種類程度の構成を実験した。まず第 2 励起光による後方励起構成に着目した。その結果、雑音指数が 1450 ~ 1490 nm において著しく増大することと、利得シフトが十分に発現しないことが判明した。また前方からの 2 波長励起が利得シフトには必須であること、また利得シフト状態で高利得（30 dB 程度）を得るためには、Tm ファイバ 40 m 以上が必要、高出力（>+20 dBm）には後方励起が必須であることなども、ここで行った実験で明らかとなった。

この構成が最適な理由を簡単に考察する。後方からの第 2 励起光 1.56 μm は、ファイバ出力端部での損失を増大させるため雑音指数を増大させる。一方、前方よりの第 2 励起光は、1.05 μm アップコンバージョン励起光と合わさることで、効率良くファイバ増幅器全体の反転分布率を低減させる。以上の理由から、本構成が最適なものと考えられる。

3.4.4.2 利得、雑音指数の波長依存性

図 3-14 に、11 波の波長多重信号を入射した場合の、小信号（-30 dBm）の利得と雑音指数の波長依存性を示す。各チャネルの入力信号パワーは-15 dBm/ch、全入力信号パワー-4.6 dBm、チャネル間隔 400 GHz 間隔、波長 1478 ~ 1508 nm とした。全入力信号パワーは、典型的な光伝送システムから規定した。波長 1478~1505 nm において、利得>20 dB、雑音指数<7 dB の特性を得た。このとき 1.05 μm アップコンバージョン励起パワーは、それぞれ 334 mW（前段、前方）、362 mW（後段、前方）、403 mW（後段、後方）であった。第 2 励起

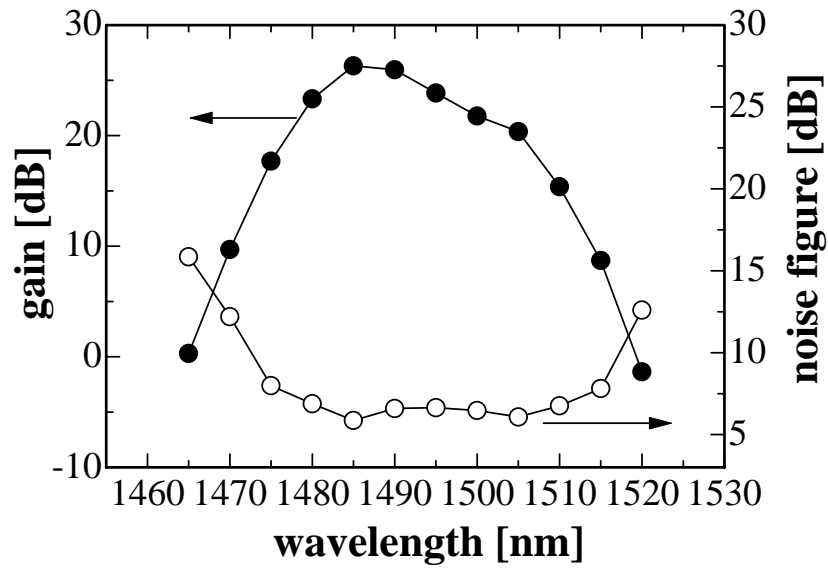


図 3-14 2 段構成利得シフト TDFA の波長多重信号増幅特性

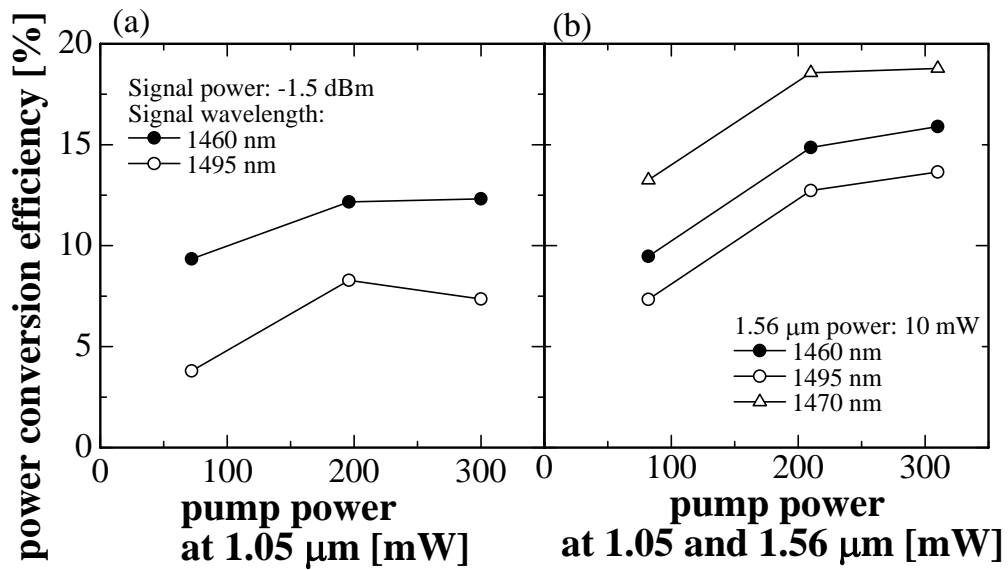


図 3-15 TDFA 単体の光/光変換効率の励起パワー依存性 (Tm ファイバ長 20 m)

(a) : アップコンバージョン励起、(b) : 低雑音励起

パワーは、16.9 mW (前段) 42 mW (後段) であった。増幅器の飽和出力+18.0 dBm であった。単一信号増幅の場合と同様な利得スペクトルが、より高出力の波長多重信号増幅において得られた。3.4.4.1 節の最適構成の考察が妥当であることを示している。増幅器の雑音指数が、小信号の場合に比べ 1~2 dB 劣化しているのは、この実験では前段が飽和し始め、

利得低下を来しており、後段の雑音指数の寄与が無視できないためと考えられる。

3.4.4.3 光/光変換効率の励起パワー依存性

Tm ファイバ長 20 m の単体 TDFA 場合

まず Tm ファイバ長 20 m の場合の、励起光パワーから信号光パワーへの変換効率（光/光変換効率）を調べる。この場合は、Tm ファイバ長が短く、利得シフトは十分ではないが、単体 TDFA の特性として把握しておく意味がある。図 3-15 (a), (b) にファイバ長 20 m、1 段構成での 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA、および低雑音励起 TDFA の光/光変換効率の励起パワー依存性を示す。高効率を実現するため後方励起構成を採用した。増幅器を完全に飽和させるため、入力信号パワーは -1.5 dBm と比較的高いレベルを設定した。

ここで光/光変換効率 η_{conv} は以下のように定義した。すなわち増幅器出力パワー $P_s(L)$ （出力側アイソレータ通過後）、増幅器入力信号パワー $P_s(0)$ （入力側アイソレータ前）と、増幅器に入射する総励起パワー P_P^{total} （Tm ファイバに入射する正味のパワー）から

$$\eta_{conv} = \frac{P_s(L) - P_s(0)}{P_P^{total}} \quad (3-7)$$

とした。図 3-15 から、励起パワーの増大に伴い、光/光変換効率も増大していくことが分かる。これは Tm イオンの利用効率が上がるためである。1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA においては、励起パワー 300 mW、波長 1460 nm で光/光変換効率 12%、1495 nm で 7.5% を得た。文献における 1.47 μm 帯 TDFA の光/光変換効率は 12 ~ 34% であり[12, 13]、本研究の結果と概ね合致する。

2 波長励起の場合、励起パワー 300 mW、信号波長 1470 nm において、光/光変換効率は最大 18% 程度であった。波長 1495 nm においても 12% を得た。これらのデータは、1 波長励起に比べ 2 波長励起の方が、反転分布に寄与する Tm イオン数が増大していること、つまり利用効率が向上していることを実験的に確かめたことに相当する。

Tm ファイバ長 60 m を用いた利得シフト TDFA の場合

Tm ファイバ長 60m を用いた高利得・低雑音利得シフト TDFA（図 3-11）では、信号パワー +0.52 dBm を入力した場合、総励起パワー 1124 mW において増幅器出力 +20.1 dBm を得、光/光変換効率 9.1% であった。この値は EDFA の効率（40 ~ 60%）に比べると、1/4 以下と非常に低い。このことが第 4 章にて述べる高効率励起方式の発案につながる。以下に低効率の原因を考察した。

光/光変換効率に関する考察

基本的に、1.05 μm 励起光パワーにより主たる反転分布が形成されている。そこで、1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA における光/光変換効率の理論的上限値を考察すると、それは励起光と信号光の光子エネルギー比の半分、 $h\nu_s/2h\nu_p=35.2\%$ 、で与えられると考えられる。ただし因子“2”は、アップコンバージョン励起が 2 光子過程であることに起因する [4]。まず、この理論上限自体が EDFA に比べ約 1/3 と低いことに気付く。すなわち EDFA において 1.48 μm 励起を採用すれば、励起光子と信号光子のエネルギー差が小さく（非放射緩和過程が少ない）、1 光子過程であるため、理論的上限は $h\nu_s/h\nu_p=95\%$ となる。

実験で得られている光/光変換効率は、この理論値よりもさらに低い。この理由はいくつか考えられる。まず（１）比較的長いファイバ（60 m）を用いているため、背景損失（ ~ 0.1 dB/m）が無視できないこと、（２）1500 nm より長波側では Tm イオンの基底状態吸収が始まり、励起されていない Tm イオン数に応じた吸収損が考えられること、また（３）1.05 μm 励起の場合、上準位 $^3\text{F}_4$ からさらに上方の $^1\text{G}_4$ 準位へと励起され、緑青色の蛍光として発光緩和する損失過程が存在すること [14]、などが上げられる。

これらの内、（１）（２）は効率を大きく左右するほどの値にならないと考えられる。第 4 章にて 1.4 μm 励起を用いた実験において、非常に高い効率が得られていることを鑑みると、（３）の緑青色蛍光による損失過程が最も疑わしいと考えている。

そこで Tm ファイバから発生する、近赤外（800 nm、 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ ）、緑青色（480 nm、 $^1\text{G}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ ；515 nm、 $^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_5$ ）、紫外（360 nm、 $^1\text{D}_2 \rightarrow ^3\text{H}_6$ ）の蛍光を観測し、これらの望ましくない過程に励起パワーが消費されていないかどうかを調べた。その結果、近赤外、緑青色においては蛍光レベルとして非常に低く（ -50 dBm）、紫外や他の可視蛍光は検出限界以下であった。これらのことから、少なくともファイバ軸方向に成長する ASE 光が主たるエネルギー消費の原因ではないと考えられる。残る可能性は、ファイバの側面に向けて発光する自然放出が考えられる。ファイバが前述の通り、気密封止モジュール内に実装されていることから、この側面蛍光の観測は不可能であった。今後の課題として、この低効率の原因をさらに探求していくことが必要であると考えている。

3.4.4.4. 2 段構成を用いた利得平坦特性

図 3-16 に 2 段構成を取り、段間に利得等化器（Gain equalizer; GEQ）を配置した、利得平坦型利得シフト TDFA の構成図を示す。利得等化器は、3 種類のマッハ・ツェンダ型干渉フィルタ（自由スペクトルレンジ FSR=53、39.1、25.5 nm）を光路に挿入するものである。

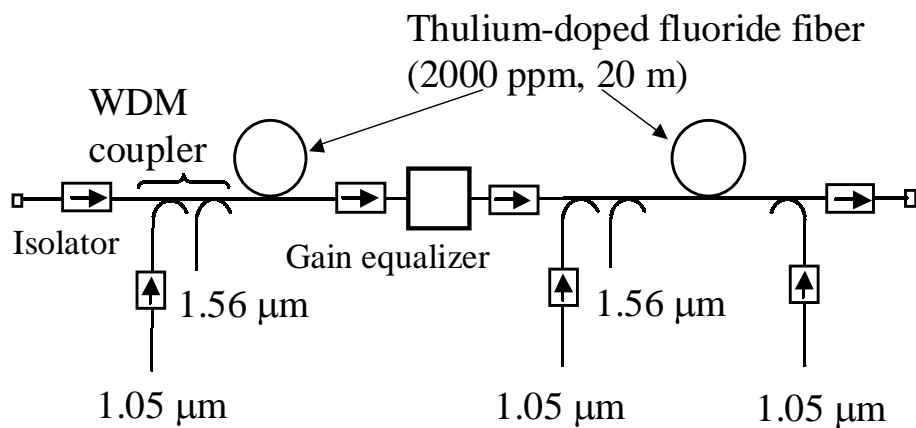


図 3-16 2 段構成を用いた利得平坦型利得シフト TDFA の構成図

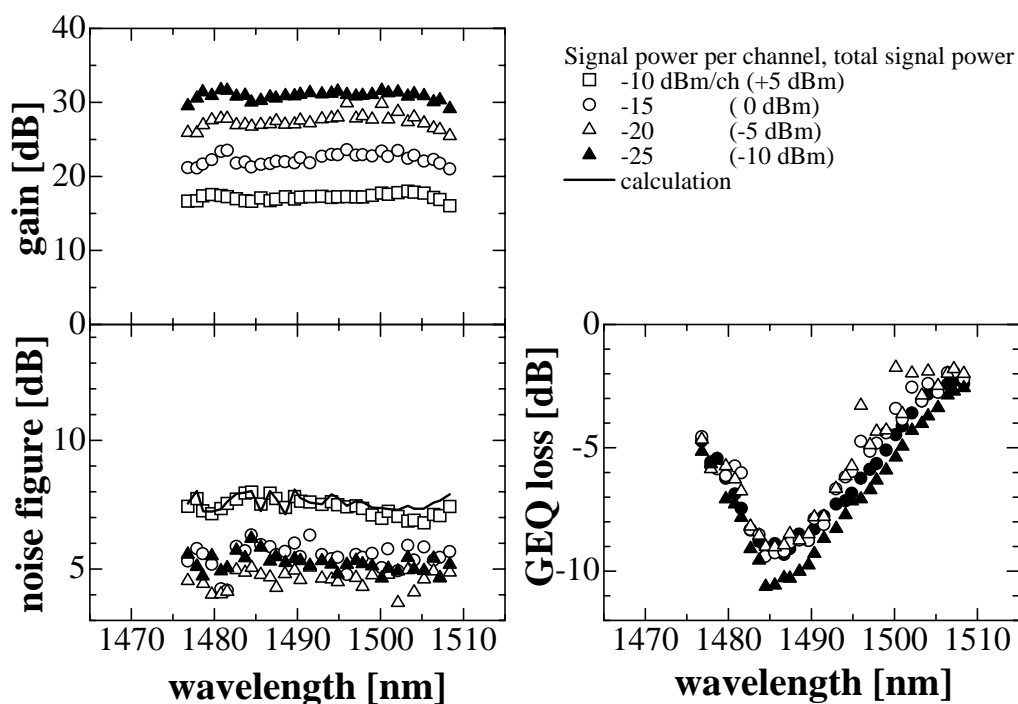


図 3-17 利得平坦化・利得シフト TDFA の利得、雑音指数、段間損失の波長依存性

利得等化器の損失が、利得と同形状で反対符号となるように、自由スペクトルレンジを設計した。この利得等化器はエタロン板をコリメータ対の光路の一部に挿入し、その挿入深さと挿入角度により透過波長と透過率を可変できるもので、擬似的にマッハ・ツェンダ干渉計の片方の光路に位相板を挿入したものと同等のものと考えてよい。ここでは上記 3 種類の FSR のものが連続で並んだもの (3 連利得等化器) を用いたが、TDFA の利得スペクトルは比較的長周期なので、実質上 FSR=53 nm と 39.1 nm のみを調整した。

図 3-17 に利得、雑音指数および利得等化器の損失の波長依存性を示す。総入力信号パワー -10~+5 dBm、波長帯域 1476.8~1508.4 nm(帯域幅 31.6 nm)において、利得平坦度 $<\pm 1.5$ dB を達成した。得られた帯域、平坦度は初期的な伝送実験を行うには十分な特性である。長距離伝送に適用するには、利得平坦度 $<\pm 0.5$ dB 程度が必要と考えられる。さらに精密に利得等化器を設計・作製することで、この利得平坦度も十分実現可能である。

ここで特筆すべき点がある。すなわち総入力信号パワーが 15 dB も変動しても、第 2 励起光 1.56 μm パワーの調整により利得平坦性を維持できる点である。1.56 μm 励起パワーを信号パワーの増減と反対に調整し、下準位数を制御することで、利得傾斜の生じない平坦な利得が常に得られる。より補足すると以下ようになる。図 2-8 を参照すると、反転分布率が高い場合(入力信号光パワーが低い場合) 波長に対し負の利得傾斜が生じ、反転分布率が低い場合(入力信号光パワーが高い場合) 正の利得傾斜が生じることが分かる。1.56 μm 励起がその傾斜を打ち消すように働くことで、総合的な利得傾斜を零に出来る。これは EDFA には無い特性であり、実際の光伝送システムでは非常に望ましいことである。

また雑音指数は、総入力信号パワー 0 dBm まではおよそ 6 dB 程度であり、総入力信号パワー +5 dBm () のときに 1.5 dB ほど劣化した。この理由は以下のように考えられる。図 3-18 に初段利得 $G_1(\lambda)$ と雑音指数 $NF_1(\lambda)$ 、および後段の雑音指数特性 $NF_2(\lambda)$ を示す。この特性と、利得等化器の損失特性 $L_1(\lambda)$ から、第 2 章(2-13)式にのっとり、全体雑音指数を計算すると、図 3-17 における雑音指数グラフ中の実線のようにになる。実験結果と極めて良い一致を見た。つまり、この雑音指数劣化の主原因は、TDFA 単体の雑音指数劣化よりもむしろ、縦列接続による雑音成分の増大が支配的であることが判明した。このことから逆に、初段利得を増大することで、この雑音指数劣化が低減できることも分かる。図 3-19 に 2 段構成の場合の、雑音指数劣化量の NF_2/G_1 依存性の計算結果を示す。 $NF_2/G_1 < -5$ dB であれば(初段利得を後段 NF よりも 5 dB 大きく取ること) 劣化量は概ね 0.5 dB 以下に抑制できる。これは重要な設計指針である。

3.4.5 高速光伝送システムへの適用可能性

3.4.5.1 光前置増幅受信の実験構成

光前置増幅受信動作特性を、変調速度 10 Gb/s の波長多重信号に対して評価した。この測定を行う理由は次の通りである。すなわち高速変調された信号に、その増幅器の雑音指数で決まる雑音(ASE 雑音) 以外の過剰雑音(増幅器内の望ましくない多重パス干渉や励起 / 増幅過程における強度・位相雑音など) が重畳されないかどうかを調べることである。この測定が、次の実証段階である波長多重伝送への最初の関門となる。

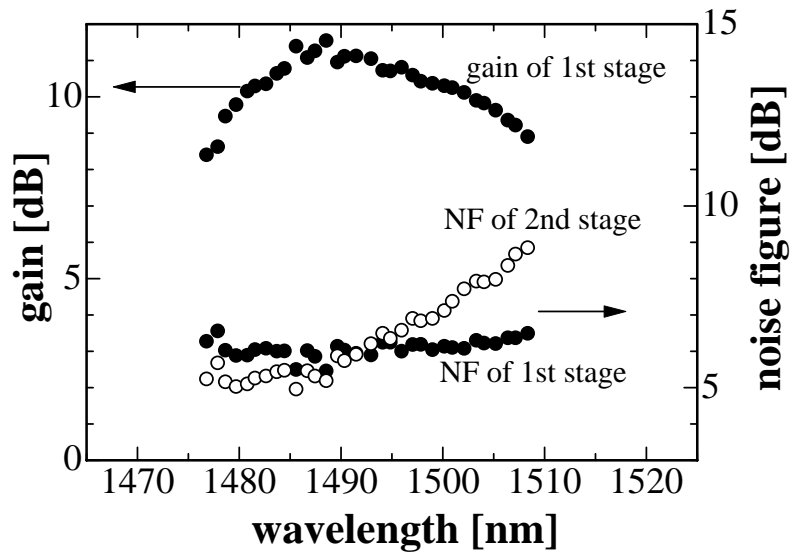


図 3-18 初段利得、雑音指数、後段雑音指数の波長依存性

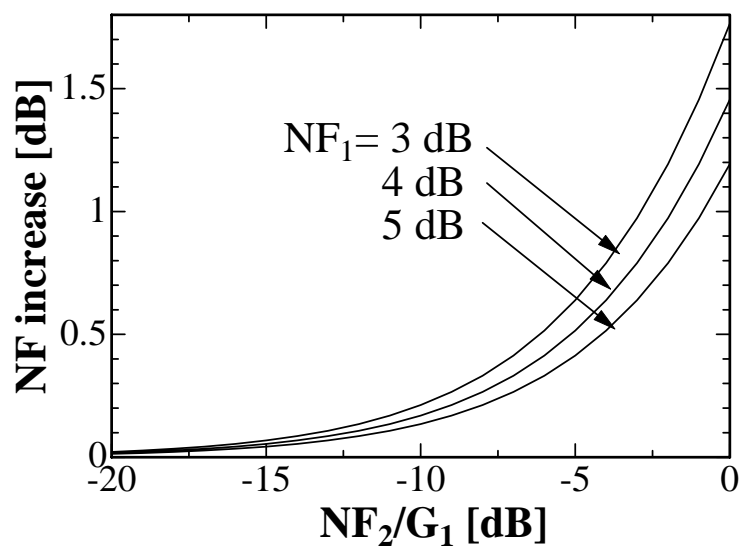


図 3-19 雑音指数劣化量の NF_2/G_1 依存性（計算値）

図3-20に評価系を示す。利得シフトTDFAを光前置増幅器として、10 Gb/sで変調されたNRZ信号（Non-retrun-to zero；擬似ランダム信号列；pseudo random bit stream）を有する12波の波長多重信号を入射して受信した。TDFA前に可変減衰器（ATT）を挿入し、受信光信号パワーに対する符号誤り率を測定した。また利得シフトTDFA後には、信号 ASE間ビート雑音を抑制するため、利得シフトTDFAにて増幅後、帯域通過フィルタ(透過帯域幅0.6 nm)にて信号帯域外のASE成分を除去し、受信器に導入した。帯域通過フィルタにはアレイ回折

格子 (Arrayed waveguide grating; AWG)を用いた。

3.4.5.2 符号誤り率特性

図3-21に符号誤り率測定結果を示す。全チャネルにおいてエラーフリー動作 (符号誤り率 $<10^{-12}$) を達成した。エラーフロアは観測されず、また全てのチャネルで同様の特性であった。また符号誤り率 10^{-9} を与える受信感度はおよそ -35 dBm であり、CバンドやLバンドの受信感度と比較して、遜色ないものであった。ただしチャネル間で受信感度に多少差があるのは、利得シフトTDFAの雑音指数の波長依存性に起因するものと考えている。

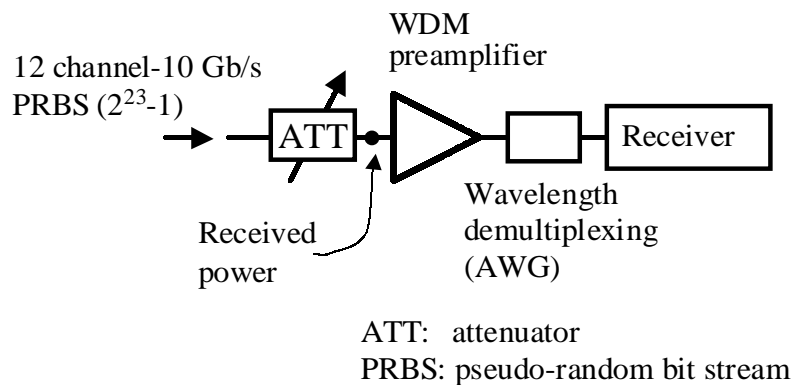


図3-20 光前置増幅受信特性の評価系

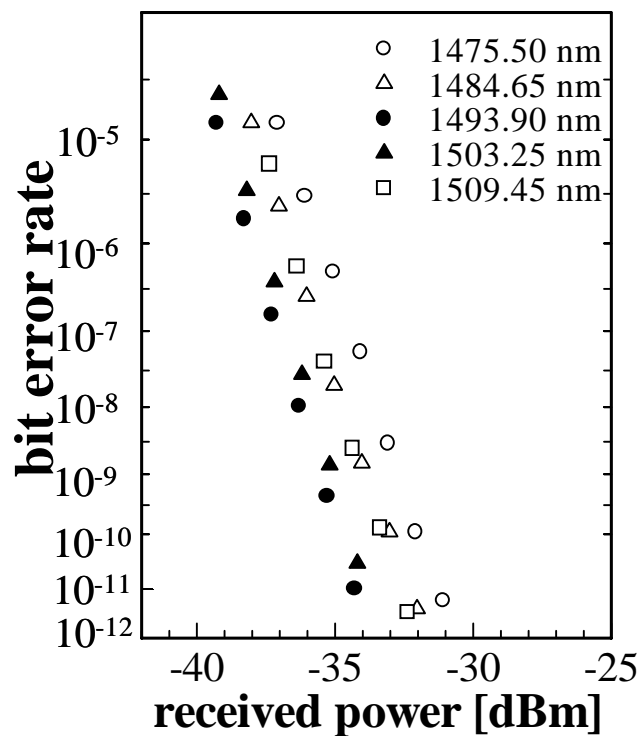


図3-21 符号誤り率特性

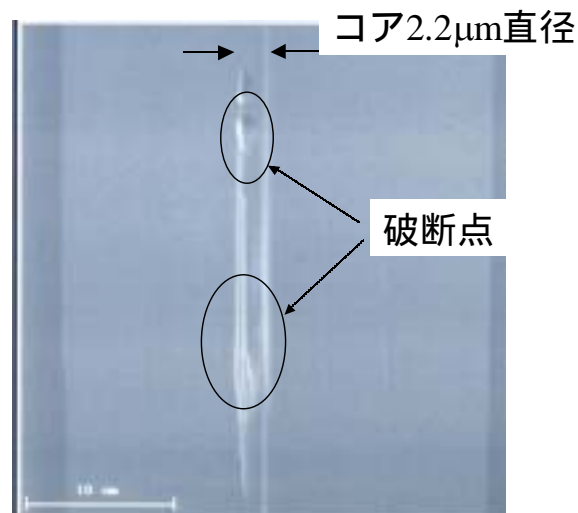


図 3-22 Tm ファイバの破断点光断面の電子顕微鏡写真

3.5 ツリウム添加ファイバの信頼性

研究開始当初の 1999 年 5 月から 11 月にかけて、低雑音励起方式を適用中に Tm ファイバの故障（ファイバ断線）が頻発した。計 5 回のダメージが実験中に発生し、実験中断を余儀なくされた。一度破断が起これば、信号パワーの透過光は 30 dB 以上も減衰し、元には戻らず、しかも突如として起こることが多かった。

原因究明のため、ファイバメーカ（NTT エレクトロニクス）と共同でファイバ破断点の観測を行った。He-Ne レーザなどの可視レーザをファイバ中を通し、輝点を観測することでファイバ破断箇所をあらかじめ同定しておく。次にイオンビームでファイバを側面から削り込んで行き、コアに到達したところで電子顕微鏡にて撮影した。図 3-22 に Tm ファイバにて発生したダメージを観測した結果を示す。明らかに何らかの原因で空隙が発生している。TOF（Time-of-flight）-SIMS（2 次イオン質量分析）による材料分析を行ったが、余りに微小な領域のため有意なデータは取得できなかった。

ダメージの原因を考察する。ダメージ原因を大きく分けて、（１）励起レーザの発振不安定と、（２）緑青色蛍光による光損傷の 2 つが疑わしいと考える。

- （１）励起レーザの発振不安定：双方向励起構成において、励起光源の相互注入が引き起こす励起光自身の発振不安定（パルス化）が挙げられる。ピークの高いパルス発振をした場合、ファイバ中の不純物などが起点になり、光吸収 加熱 ガラス相転移点を越える 冷却による再結晶化（散乱体形成） 破断という過程をたどる可能性がメーカより指摘された。特にフッ化物ガラスはガラス相転移温度は 300~400 と、

石英（1000 以上）に比べ低いこともそれを助長している[10]。そこで 99 年 12 月以降、1.05 μm 励起レーザ用アイソレータの開発・適用、時間波形の観測によるパルス化監視、反射点の低減（具体的には、コネクタ接続点を減らし溶融スプライスに置換）等を行った結果、2000 年 3 月末までにダメージ頻度は激減し（計 2 回 / 3 ヶ月）、さらに 2001 年 3 月の伝送実験完了までほぼ 2 年間、無事故になった。

- （２）緑青色蛍光による光損傷：Tm 添加 ZBLAN 系ガラスにおいて、1.1 μm 帯励起によるアップコンバージョン過程により青色蛍光が発生し、ダメージが発生することが知られている[14]。15~20 分でダメージが発生し、CW 発振が停止するとの報告がある。しかし赤外域の光照射によりダメージは解消する。この現象が今回のダメージと何らかの関連性があるかどうか、確認の意味もこめて 3.4.4.3 節において述べた緑青色~紫外蛍光観測を行ったが、非常に低いパワーレベルであった。この青色蛍光により Tm ファイバにダメージが発生しているとは考えにくい。

なお Tm 添加フッ化物ファイバの信頼性について、ベルコア規格に基づく非励起状態の評価は行われている。その結果、石英ファイバと遜色ないレベルまで信頼性が向上してきていることが報告されている[15]。しかしながらフッ化物ファイバは石英ファイバに比べ構成元素の種類も多く、本質的に低損失化が難しいと指摘されている[16]。フッ化物ファイバの励起状態における詳細な信頼性評価試験を行うことが今後重要になってくる。

3.6 伝送実験用試作装置

図 3-23、図 3-24 に、第 5 章で述べる伝送実験用に作製した、低雑音励起利得シフト TDFA の概観写真と、内部構造を示す。図 3-16 の構成を採用している。Yb ファイバレーザを励起光源とし、Tm ファイバ長総計 40 m を用いている。この装置では、今まで第 2 励起光源として使用してきた DFB レーザ + EDFA の組み合わせに代えて、1.56 μm 半導体レーザ（アンリツ製、ファブリーペロ型、AF5A211、定格出力 100 mW）を採用した。3.3 節の予備実験結果から、狭線幅の光源を用いた場合、励起波長として 1540~1560 nm においてほぼ同等の利得特性を実現できることが分かっていた。したがってファブリーペロ型半導体レーザのような比較的スペクトル幅（5 nm）の広い光源でも、励起用を使用することが出来ると考えられる。より詳しくは以下のように説明できる。1.56 μm 帯に相当する $^3\text{H}_6$ 、 $^3\text{H}_4$ 遷移の吸収スペクトルは、波長 1.65 μm をピーク波長とし、非常に広い波長範囲にわたり広がっている。1.56 μm 近傍は、その短波側の裾野にあたり、吸収係数の波長依存性は非常に小さい。

このため 5 nm 程度の波長差すなわち吸収係数の差は、励起パワーの調整でカバーでき、下準位数密度の生成率は変わらないので、TDFA の動作特性に影響を与えないということが結論される。

また手作業でファイバ接続などの実装作業を行うことを想定したため、装置サイズを大きめ ($830 \times 720 \times 170 \text{ mm}^3$) に設計した。さらなる高密度実装により標準的な 17 インチラックに収納可能な体積に圧縮 (体積比 1/4 以下) することは、このままの構成部品でも十分可能である。



図 3-23 低雑音励起利得シフト TDFA の試作装置概観

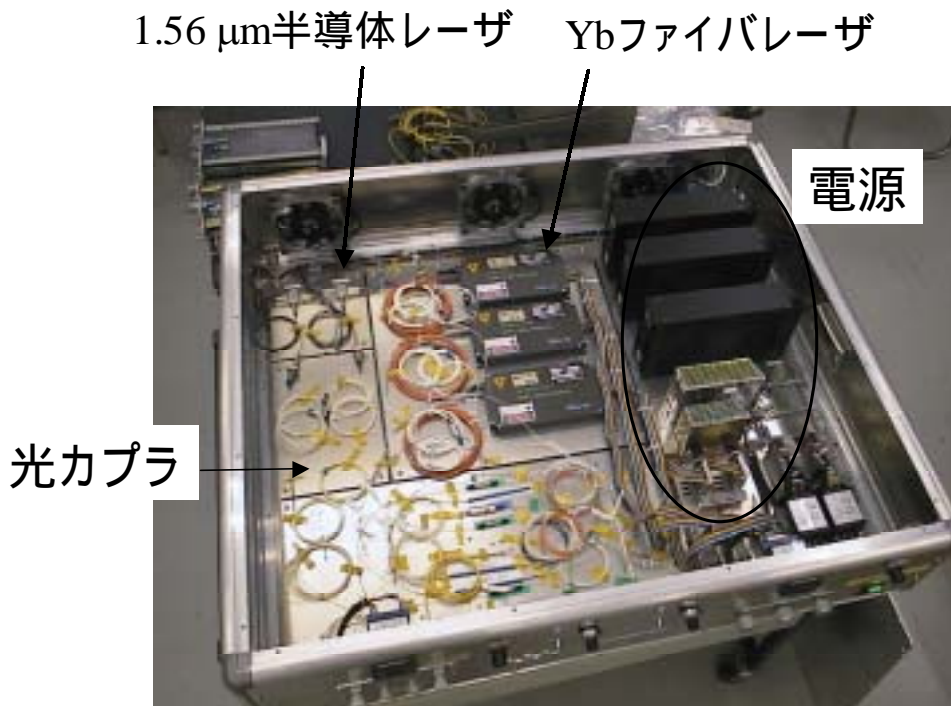


図 3-24 低雑音励起利得シフト TDFA の試作装置内部

3.7 新しい励起光源の提案

3.7.1 開発の背景

3.4.4 節の議論から、波長多重伝送に対応するためには、利得シフト TDFA の励起光源として、波長 1.05 μm 、総光出力>1 W が必要であることが分かった。さらに波長 1.05 μm 帯光源は、1.55 μm 帯 Er,Yb 共添加ファイバ増幅器 (EYDFA) [17]、1.3 μm 帯 Pr (プラセオジウム) 添加ファイバ増幅器 (PDFA) [18] の励起光源としても有効であり、実用的な高出力励起光源の開発が求められている。現在、研究開発レベルにおいては波長 1.05 μm 帯、出力 500 mW 級の半導体レーザが実現されている[19]。しかし市販品レベルではほとんど無く[20]、ノーテル社において 400 mW 級の半導体レーザチップを供給しているのみである[21]。

出力 1 W 以上が可能な波長 1.05 μm 帯高出力励起光源としては、従来から希土類イオン Nd^{3+} (ネオジウム) を添加した半導体レーザ (LD) 励起固体レーザ (Nd:YAG ; 波長 1.064 μm 、Nd:YLF ; 波長 1.047 μm) があり、さらに近年 Yb³⁺ 添加ファイバレーザ (波長 1.02 ~ 1.1 μm) が市販品として入手可能になっている[22]。しかしながら従来の LD 励起固体レーザは、光変換効率が低く (<20 ~ 30%)、サイズが大きい (20~100 cm の共振器長) 通信装置への導入は難しいと考えられる。一方、Yb (イッテルビウム) 添加ファイバレーザは高効率 (~ $\geq 40\%$) であり、かつレーザ媒質が光ファイバであることから、光ファイバ通信技術への親和性も高く、信頼性も高いため、ほぼ理想的な光源と言える[23]。しかしサイズの点で、通常励起用に用いられる半導体レーザのパッケージ (例えばパタフライ型パッケージ ; 概算 $30 \times 15 \times 7.8 \text{ mm}^3$ [24]) に比べると大きい ($90 \times 160 \times 18 \text{ mm}^3$ [22]、体積比=74 倍) という課題がある。これはレーザ媒質である Yb 添加ファイバが、通常数メートル~数 10 メートル以上あるため、ボビン (ボビン径>30 mm) に巻く必要があるためである。したがって Yb 添加ファイバレーザの特長を有し、かつ超小型な励起光源の開発が必要であると考え。そこで本研究では、半導体レーザ励起 Yb:YAG レーザの特徴に着目し、ファイバ増幅器の励起に適していることを指摘し、試作・開発を通して、その実用性を実証する。

図 3-25 に Yb (原子番号 70) イオンのエネルギー準位構造および誘導放出・吸収スペクトルを示す[25, 26]。Yb は他の希土類イオンと異なり、基底状態 $^2\text{F}_{7/2}$ と励起状態 $^2\text{F}_{5/2}$ のみの 2 準位系 (エネルギー間隔およそ 10000 cm^{-1}) である。それぞれが第 2 章に述べたように、結晶場によりシュタルク分裂している。分裂幅は $^2\text{F}_{7/2}$ 準位で 785 cm^{-1} 、 $^2\text{F}_{5/2}$ では 575 cm^{-1} である。励起波長は 940 nm または 970 nm であり、波長 1031nm と 1050 nm の 2 本のレーザ発振を得る。この過程での、励起光子エネルギーとレーザ光子エネルギーの比であるストークス効率は $\eta_S = h\nu_l / h\nu_p = 91\%$ (940 nm 励起、1030 nm レーザ発振のとき) となる。す

なわち量子欠損 $1-\eta_S$ （励起光子エネルギーのうち、レーザ光子に変換されない割合）はわずかに9%である。しかも、励起準位と基底準位のエネルギー間隔がおおよそ 10000 cm^{-1} あるため、フォノンエネルギーが 800 cm^{-1} 程度の酸化物結晶[27]であっても非放射遷移で緩和する確率は零に等しい[28]。このため発光量子効率 η_Q は100%となる。したがって全体の量子効率 $\eta_Q^{Total} = \eta_Q \cdot \eta_S > 90\%$ となる。Nd:YAGでの値は $\eta_S = 76\%$ であるので、Ybでは高い量子効率に伴い、動作効率そのものをNd系固体レーザよりも高効率化できる可能性がある。

Yb添加固体レーザの歴史は古く、1971年に初めてのLED励起Yb:YAGレーザ発振が温度80Kにおいて観測された[29]。しかしながら、励起波長帯域が940 nmおよび970 nmの2つのみであり、当時主流であった放電ランプ励起では高効率を得られず、また3準位系の

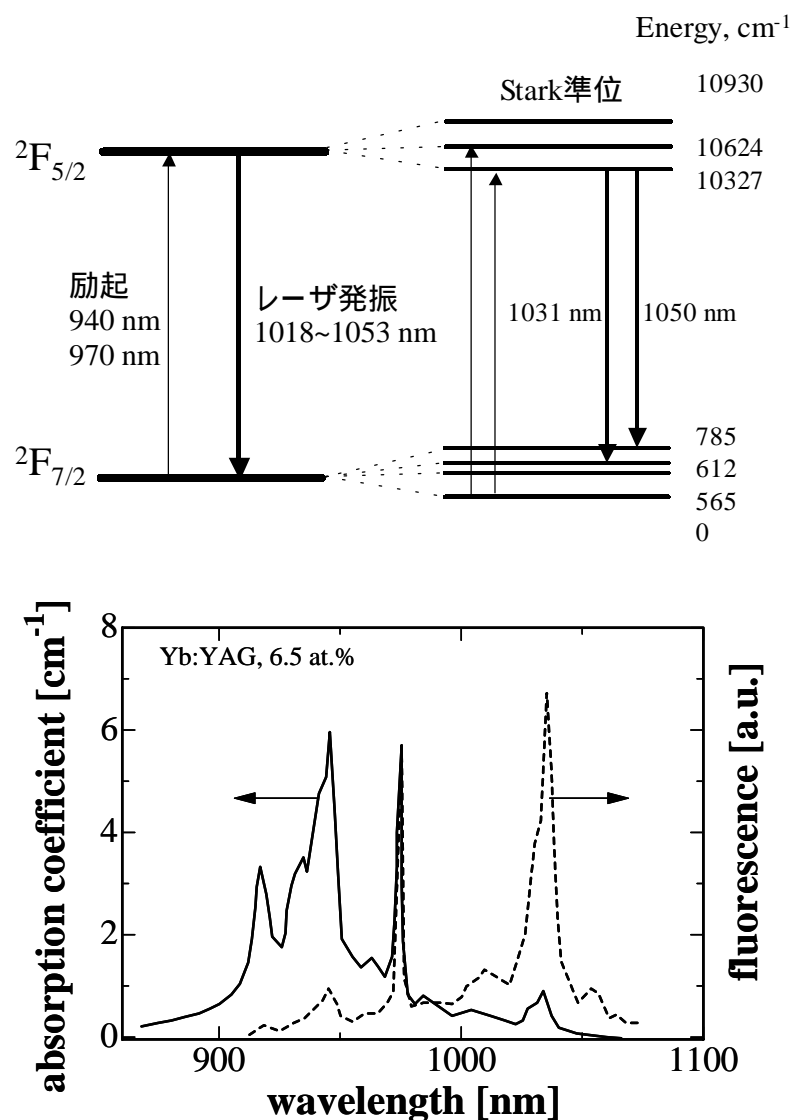


図 3-25 Yb のエネルギー準位構造（上）と吸収・蛍光（誘導放出）スペクトル（下）

表 3-2 Yb:YAG レーザの分光学的特長

項目	分光学的特長		Yb:YAG レーザ としての優位性
	Yb:YAG	Nd:YAG	
量子効率	高、91%	低 76%	高効率
熱負荷	低 11%	高 30 ~ 40%	高出力
吸収帯域	広、10 nm@940 nm	狭、2 nm@808 nm	安定
添加限界濃度	高、~50 at. %	低、1.4 at. %	超小型
励起状態吸収	無	有	高効率
波長可変性	広、1018 ~ 1053 nm	無	光源としての多彩な役割

ため低温での動作になるなど魅力が薄いため、大きな注目を浴びることは無かった。1991年にマサチューセッツ工科大の Fan 等が初めて、半導体レーザ励起を用いることで、常温での高効率連続発振が可能であることを実証した[30]。彼らは Yb:YAG の有する分光学的な優位性を半導体レーザ励起により抽出することが可能なことを示した。また 80 年代末から 90 年代にかけて、励起半導体レーザの高出力化が著しく進展し、従来のランプ励起に代わり、半導体レーザ励起方式が急速に台頭してきたという背景もこの進展を後押しした[31]。現在、LD 励起 Yb:YAG レーザの出力として数 100 W ~ kW クラスまで実証されており、動作特性は理論的に解析されている[25]。Yb:YAG レーザはワットクラスにおいても、高性能レーザとなる潜在的可能性を秘めているが、今までの報告例は MIT の Fan[32]、福井大の平等[33]によるものしかない。そこで本研究では、LD 励起 Yb:YAG レーザをファイバ増幅器励起用に最適設計し、3 W 級出力を実現することを試みた。

3.7.2 イッテルビウムの分光学的特性

図 3-25 のエネルギー構造を有する Yb:YAG レーザを LD 励起することで、表 3-2 のような優れた分光学的特長が発現し、LD 励起 Nd:YAG レーザに対して飛躍的に高性能化できる可能性がある[25, 30]。本研究では、これらの特長から Yb:YAG をファイバ増幅器励起光源とした場合、Nd:YAG や Yb ファイバレーザには無い以下の優れた特長があることを着想し、世界で初めて実証した[34]。

- (1) ファイバ増幅器を励起可能：Yb のシュタルク準位は広く分裂しており、波長 1018 ~ 1053 nm までの 40 nm ほどの可変波長幅を有している[35]。これは従来の Nd 添加固体レーザでは達成できない。このため、TDFA(励起波長帯域 1050 ~ 1060 nm)[4]、

PDFA (励起波長帯域 1020 ~ 1030 nm) [36]、Er, Yb 共添加ファイバ増幅器 (励起波長帯域 800 ~ 1100 nm) [37]を励起できる。

- (2) 小型かつ頑丈 : Yb の有する高い吸収係数 (Nd の約 30 倍) から、Yb:YAG 結晶を厚み数 100 μm のマイクロチップとすることが出来る[33]。これにより、励起半導体レーザのパッケージ内に同梱することも可能である。またマイクロチップの両端面に、共振器ミラーを直接製膜することで、機械的振動や変位に強い共振器構造となる。
- (3) 高効率・高出力 : Yb は非常に高い量子効率 (~ 90%) を有しているため、Nd 添加固体レーザ (量子効率 76%) よりも高い光/光変換効率が期待できる[30]。しかも、熱負荷は約 11% と Nd 添加固体レーザの約 1/3 であり、熱的光学収差などが少ないため、ビーム品質を損なうことなく高出力化できる[38]。

しかしながら、Yb はレーザ下準位 (図 3-25 のエネルギー値 612 cm^{-1} 、 785 cm^{-1} のシュタルク準位) におよそ基底準位の 5% の熱分布を持つ「準 3 準位エネルギー構造」であるため、室温における発振閾値が高く、高効率動作のためには十分な励起密度が必要であるという課題がある。また高密度励起を行うことにより、結晶内の温度が上昇し、そのため下準位数密度が上昇することで、レーザ特性が劣化する可能性がある。以上から Yb:YAG レーザ開発における技術課題は、次の 2 つの課題を同時実現することにある。(1) 低ビーム品質のマルチモード半導体レーザを用いて基底準位吸収を上回る高密度励起を実現することと、(2) 高密度励起においても、結晶内の温度上昇を十分に低く保つような排熱構造を実現すること、という課題である。またファイバ増幅器への適用における課題は、シングルモードファイバへの高効率な光結合、Er, Yb 共添加ファイバあるいは Tm 添加ファイバと Yb:YAG 励起を組み合わせた新規ファイバ増幅器構成の励起・増幅プロセスの把握と最適化が挙げられる[34]。

本研究では、上記の 2 つの課題を同時に解決しうるワット級レーザ設計論を確立し、出力 3 W 級の LD 励起 Yb:YAG レーザの設計・試作を行った。これを Er, Yb 共添加ファイバ増幅器 (EYDFA) の励起光源とすることで、高い飽和出力 +29.3 dBm (信号波長 1545 nm) を達成し、ファイバ増幅器への適用可能性を実証した。と同時に利得シフト動作に供することで、TDFA への適用可能性も実証した。このことは既に 3.4.3 節に述べた。またこの設計・試作を通し、常温で Yb:YAG レーザの高効率動作を実現するために必要な励起密度などの諸条件を明らかにし、これを Yb:YAG レーザの更なる小型化のためにマイクロチップ Yb:YAG レーザへ適用することで、最大出力 2.7 W を得ることに成功した。

本節では以下の順序で述べる。まず LD 励起 Yb:YAG レーザの設計について説明し、次に

表 3-3 LD 励起 Yb:YAG レーザへの要求仕様

項目	仕様	備考
レーザ出力	3 W	CW、シングルモードファイバ出力
波長	1.05 μm 帯 (1.03 ~ 1.05 μm)	TDFA、PDFA、EYDFA 励起可能
装置寿命	~ 10 万時間	地上用通信システムの典型値

表 3-4 LD 励起 Yb:YAG レーザの基本設計における主要構成要素

構成部品	設計パラメータ	設計値
Yb:YAG レーザ発振器	<ul style="list-style-type: none"> 所要励起密度 出力結合 動作温度 共振器パラメータ 熱レンズ解析 	<ul style="list-style-type: none"> 出力>3 W 常温動作(動作温度 300K) 励起パワー<12 W
励起光学系	<ul style="list-style-type: none"> レンズ焦点距離 レンズ間隔 	<ul style="list-style-type: none"> 所要励起密度 (集光スポット径) レーリ長
ガウスビーム伝搬光学系	<ul style="list-style-type: none"> 発振光をコリメートするための光学系 	<ul style="list-style-type: none"> ビーム発散角
シングルモードファイバ結合光学系	<ul style="list-style-type: none"> 非球面レンズ位置 焦点距離 	<ul style="list-style-type: none"> 結合効率>85%

Er, Yb 共添加ファイバ増幅器の動作原理と特徴、Yb:YAG レーザ励起による高出力、高利得増幅器動作について述べる。

3.7.3 半導体レーザ励起イッテルビウム固体レーザの設計

表 3-3 に Yb:YAG レーザに対する目標仕様を示す。TDFA などの励起を想定し、3 W 級高出力を目指とした。また装置寿命は、実用システムでは必須の仕様であり、本レーザにおいても同程度を目指とした。以下に示す構成要素 (表 3-4) ごとにブロック設計を行う。ここでは心臓部となる Yb:YAG レーザ発振器と励起光学系を設計する。

全体構想

図 3-26 に全体構想を示す。12 W 出力のファイバ結合型 940 nm マルチモード LD (ブロードエリア型、コア径 400 μm 、開口数 0.33、Jenoptik 社製 JOLD-12-CPXF-1L) を励起用 LD

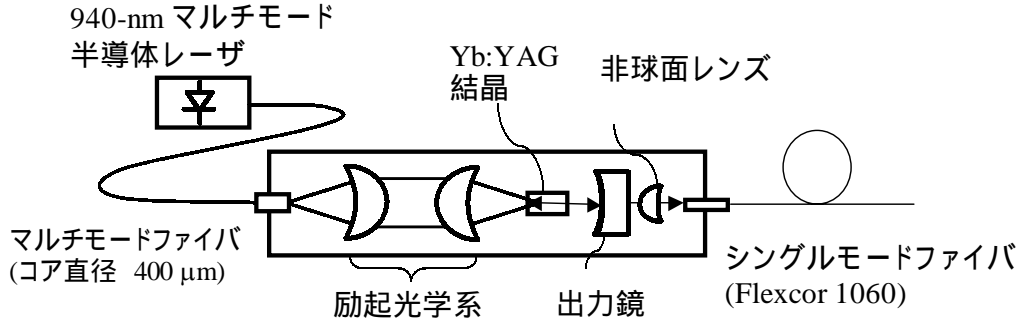


図 3-26 半導体レーザ励起バルク型 Yb:YAG レーザの構成図

として用い、励起光学系によりビームを集光し、円柱状 Yb:YAG のバルク結晶を端面励起する。このバルクレーザの設計試作を通して、次にマイクロチップ化する。

基本数値設計

所望出力 3 W を得るための基本設計を行う。Yb:YAG レーザは常温でレーザ下準位に電子分布を持つ準 3 準位レーザであり、Nd:YAG とは異なる固有のレーザ最適設計が要求される。特にレーザ発振光自体がレーザ結晶中で吸収されるため、結晶サイズ・濃度の最適設定が非常に重要である。

TDFA と同様にレート方程式近似を用いる。反転分布密度 $\Delta N(r, z)$ と光子数 Φ の時間変化を励起レートと誘導放出レートで記述する。ここでは共振器モードと励起ビーム強度分布とのモード整合、およびレーザ下準位数密度の温度依存性を考慮した準 3 準位系レート方程式を立て [次式(3-8), (3-9)] [39, 40]、数値的に解くことにより共振器内の光子数密度を計算し、出力結合を介して発振器出力を算出する手法を採用した。

$$\frac{d\Delta N(r, z)}{dt} = (f_1 + f_2)Rr_p(r, z) - \frac{\Delta N(r, z) - \Delta N^0}{\tau} - \frac{(f_1 + f_2)c\sigma\Delta N(r, z)}{n}\Phi\phi_0(r, z) \quad (3-8)$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{c\sigma}{n} \iiint \Delta N(r, z)\Phi\phi_0(r, z)dV - \frac{\Phi}{\tau_{CAV}} \quad (3-9)$$

ただし、(3-8)式：反転分布密度のレート方程式（右辺第 1 項：励起項、第 2 項：自然放出による熱平衡への緩和項、第 3 項：誘導放出による反転分布密度の減少項）、(3-9)式：光子数のレート方程式（右辺第 1 項：誘導放出項、第 2 項：出力結合項）を表す。また、 $\Delta N(r, z)$ ：反転分布密度（空間依存）、 $r_p(r, z)$ ：規格化された励起光強度分布、 $\phi_0(r, z)$ ：規格化された光子分布、 r ：径方向座標、 z ：軸方向座標、 f_1 ：下準位占有率、 f_2 ：上準位占有率、 R ：励起レート、 c ：光速、 σ ：誘導放出断面積、 τ ：上準位寿命（蛍光寿命）、 τ_{CAV} ：共振器

寿命、 Φ : 光子数、 n : 屈折率である。占有率 f_i は、

$$f_i = \frac{g_i \exp(-E_i/kT)}{\sum_j g_j \exp(-E_j/kT)} \quad (3-10)$$

で計算される。ただし g_j : シュタルク準位 j の縮退度、 E_j : シュタルク準位 j のエネルギーである。計算に用いたパラメータを表 3-5 に示す。

(3-8)、(3-9)式を解くことにより、動作温度をパラメータとしたレーザ出力の励起 LD パワー依存性を計算できる。図 3-27 に計算結果を示す。常温動作 (300K) において、吸収励起パワー10 W 程度(入射励起パワー11 W)で CW レーザ出力 4 W が達成できる見込みである。

表 3-5 出力計算に用いたパラメータ[25]

結晶	Yb:YAG
レーザ発振波長	1030 nm
誘導放出断面積	$3.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
上準位寿命	1.2 msec
Yb 添加濃度	5 at.% ($=6.9 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)
結晶長	3 mm
励起波長	940 nm
LD 励起直径	400 μm
共振器モード直径	400 μm
出力結合率	10 %

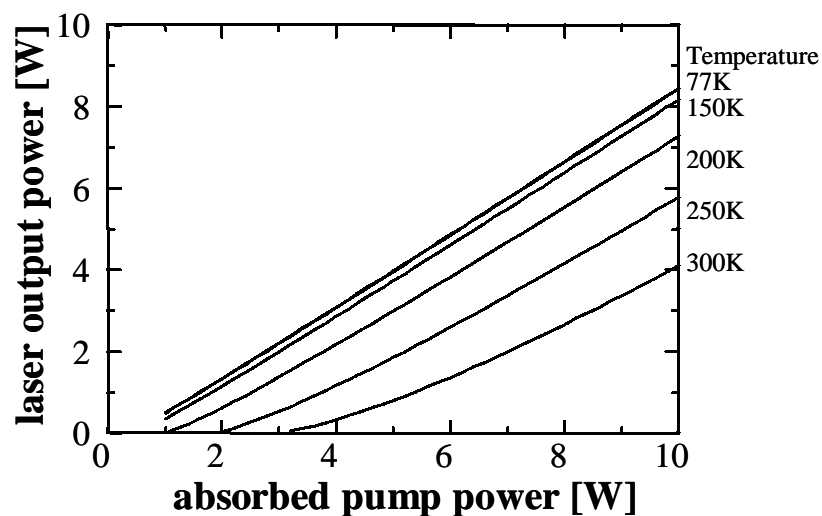


図 3-27 LD 励起 Yb:YAG レーザの入出力特性 (計算結果)

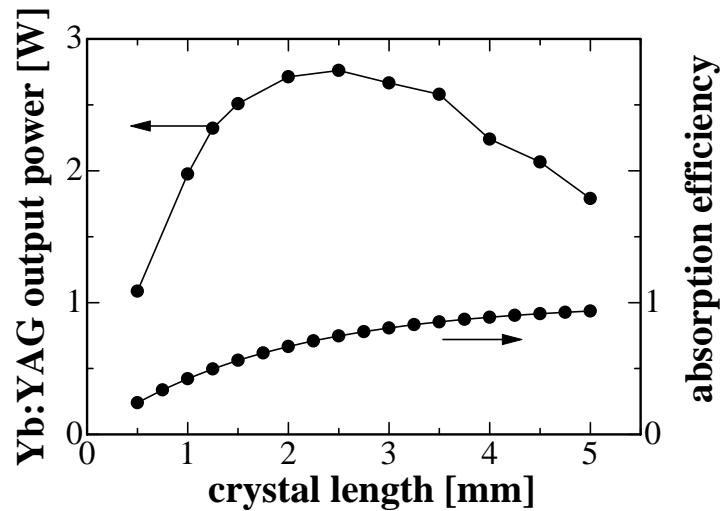


図 3-28 Yb:YAG レーザ出力パワーの結晶長依存性（計算結果）

最適結晶長

Yb:YAG は準 3 準位レーザーであり、結晶長を任意に伸長することは基底状態吸収による出力低下を来すため、不適當である。しかし励起光を十分吸収するために、ある程度の結晶長が必要である。従って与えられた励起密度に応じた最適結晶長が存在する。図 3-28 にレーザー出力の結晶長依存性の計算結果を示す。温度 300K、Yb³⁺濃度 5 at.%、入射励起パワー 10 W、励起直径 400 μm（励起密度 8 kW/cm²）とした。このとき最適な結晶長は約 2.5 mm であることが分かる。実験では結晶長 3 mm を用いた。

以上により励起密度>8 kW/cm²、入射励起パワー~11 W（吸収励起パワー10 W）、Yb³⁺濃度 5 at.%、結晶長さ 3 mm とし 10%の出力結合を行うことで、発振器出力として 3 W を達成できると考えられる。

励起光学系

上記レーザー発振器設計を受け、400 μm 直径に集光する励起光学系を設計する。励起 LD を点光源の集合体と考え、空間インコヒーレント光線の追跡を行う「光線追跡法」は見通しが悪く煩雑である。また LD 光の持つ部分コヒーレンスについては記述できず、集光点近傍の回折効果を予測できない。ここでは回折限界指数 M^2 値（ビーム品質）を用いることで、LD ビームをガウスビームとして記述できることを利用する[41]。ファイバ結合型ブロードエリア半導体レーザーのビーム品質は $M^2 \cong 200$ である。この M^2 値と光線行列（ABCD マトリクス：光学要素を記述する伝搬行列）によりマルチモードビームの複素 q パラメータを追跡することで、近軸領域のビームスポットの挙動を正確に予測できる[42, 43]。

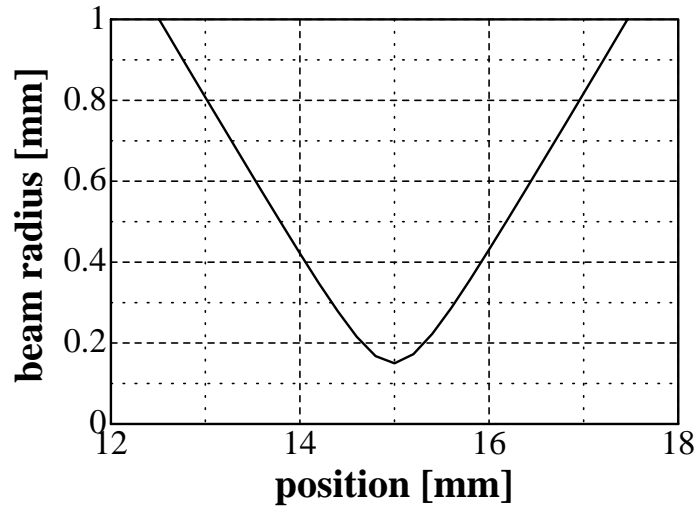


図 3-29 励起ビームの空間モードを考慮した集光特性（計算結果）

図 3-26 に励起光学系の配置図も示してある。まず幾何光学的に設計を行う。焦点距離 20 mm のレンズによりコリメートした後、焦点距離 15 mm のレンズで集光することで、実効像倍率 $=15/20 = 0.75$ 倍とし、像高 $\times 0.75 = 300 \mu\text{m}$ と設計した。これにより励起直径 $\sim 400 \mu\text{m}$ を達成する。

励起光学系における各光学素子の ABCD 行列の積を計算し、複素 q パラメータ [次式 (3-11)] を追跡する。ただしマルチモードであることを考慮するため回折限界指数 M^2 値を含む形式にしてある。

$$q^{-1} = R^{-1} - i \frac{M^2 \lambda}{n w^2} \quad (3-11)$$

ここで R : 曲率半径、 λ : 波長、 n : 屈折率、 w : ビーム半径 ($=\sqrt{2r^2}$ 、2 次モーメント $\overline{r^2} = \int_0^\infty r^2 I(r) dr$) である。光学系伝搬後の q パラメータは伝搬前と次式の関係がある。

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (3-12)$$

ここで、 q_1 : 伝搬前の q パラメータ、 q_2 : 伝搬後、 A, B, C, D : 光学系の ABCD 行列要素である。これらの理論式を用いて、LD ビームの伝搬をトレースした結果を図 3-29 に示す。励起スポット半径 $w_p < 200 \mu\text{m}$ を満たす光路長を 0.5 mm 程度、 $w_p < 400 \mu\text{m}$ を

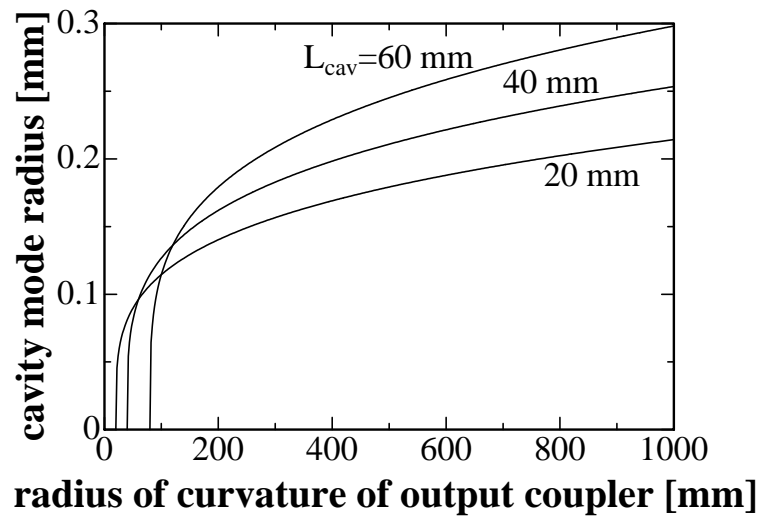


図 3-30 共振器モード半径の出力鏡曲率依存性（計算結果）

満たす光路長を 2 mm 確保できるので、結晶の半分以上の領域で 400 μm 直径の共振器モードに空間的オーバーラップが可能である。

共振器

共振器モード直径 400 μm を実現する共振器構成は以下のように設計できる。結晶の励起面側を共振器リアミラーとし、出力鏡を直線状に配置する構成において、共振器長をパラメータとし共振器モード半径の出力鏡の曲率半径依存性を計算した（図 3-30）。この図から共振器長 20 ~ 60 mm 程度とすると、出力鏡曲率半径 150 ~ 800 mm 程度で共振器モード直径 300 ~ 400 μm を達成できる。ただし以下に述べる熱レンズ効果は考慮していない。

結晶内の温度上昇と熱レンズ効果

最大励起パワー 8 W を投入した場合の Yb:YAG 結晶における温度上昇値について、有限要素法ソフトウェア「COSMOS/M ver. 1.75」（SRAC 社）を用いて計算した[44]。その結果、最大温度上昇値は約 9°C と計算された（図 3-31）。この程度の温度上昇であれば、準 3 準位系に起因するしきい値増大は無視できる。計算された温度分布から、結晶に発生する熱的光学収差を計算した（図 3-32）。結晶の半径方向位置 r において、次式に示す光軸方向 z の光路差を積分した値を示している。

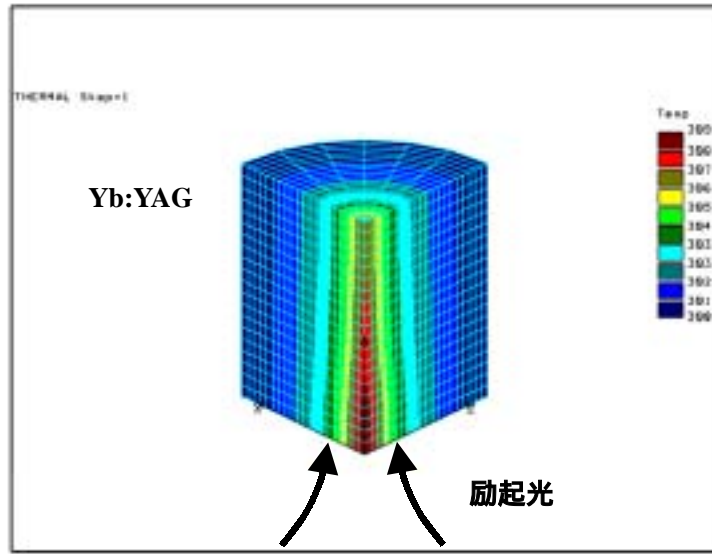


図 3-31 有限要素法による結晶内の温度分布（計算結果）

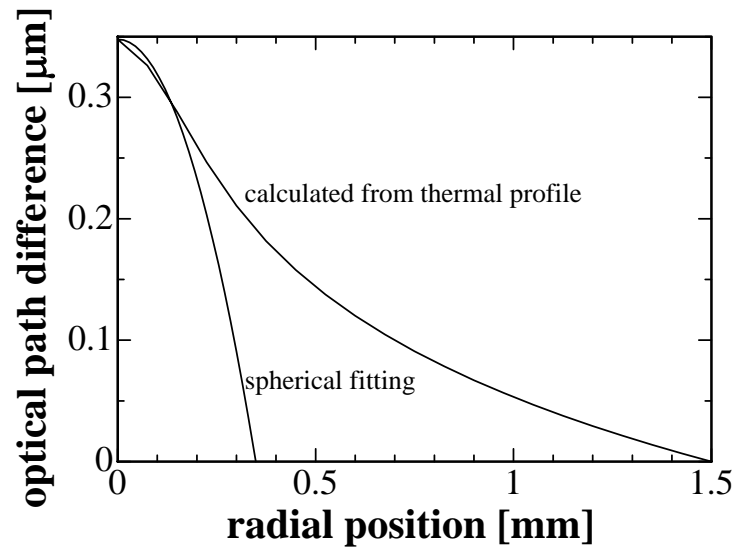


図 3-32 Yb:YAG 結晶における熱的光学収差（計算結果）

$$OPD(r) = \int_0^l \Delta T(r, z) \frac{dn}{dT} dz \quad (3-13)$$

ただし、 $\Delta T(r, z)$ ：温度上昇値、 $\frac{dn}{dT}$ ：YAG 結晶の屈折率の温度係数、 l ：結晶長を表す。

共振器モード半径内の近軸領域（半径位置 $r < 200 \mu\text{m}$ ）がレーザー光の共振領域である。この

領域の光学収差を球面レンズで近似すると、焦点距離 175 mm のレンズであると近似できる。これを熱レンズと言う。図 3-30 には熱レンズが存在しない場合の共振器モードを計算しており、熱レンズが存在することにより共振器モード径は若干の変動を受ける。共振器長と出力鏡の曲率半径を大きめ（共振器長 60 mm、出力鏡曲率 800 mm）に設定することで、その変動を補償し、共振器モード直径 400 μm を確保できる。

まとめ

下表 3-6 に示すレーザ設計により、出力 3 W 以上の常温動作 LD 励起 Yb:YAG レーザが実現可能であることが分かった。

表 3-6 LD 励起 Yb:YAG レーザ発振器設計パラメータ

励起密度	$>8 \text{ kW/cm}^2$
励起パワー	$>\sim 11 \text{ W}$
励起光学系透過率	$>90\%$
結晶吸収パワー	$>10 \text{ W}$
出力	$>3 \text{ W}$
結晶長さ	3 mm
Yb ³⁺ 添加濃度	5 at. %
共振器長	20 ~ 60 mm
出力鏡曲率半径	150 ~ 800 mm
共振器モード直径	300 ~ 400 μm
出力鏡透過率	10%

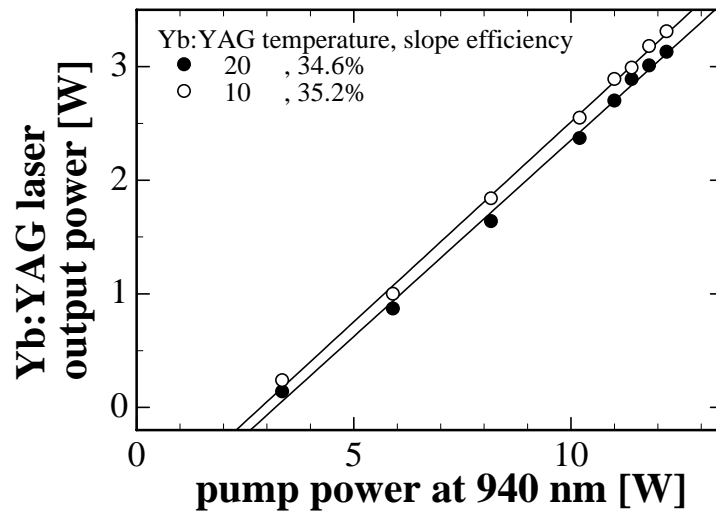


図 3-33 3 W 出力バルク Yb:YAG レーザの入出力特性（実験結果）

3.7.4 実験構成とレーザ出力特性

3.7.4.1 3 W 級バルク Yb:YAG レーザ

図 3-26 に示すバルク Yb:YAG レーザ試作機を構成した。結晶の裏面は、励起レーザに関し無反射（反射率<15%）、レーザ波長に対し高反射（反射率>99.8%）となる 2 波長コーティングを施した。結晶表面はレーザ波長に対し、無反射（反射率<0.2%）を施した。レーザ波長（1030～1050 nm）と励起波長（940 nm）が極めて接近しているため、2 波長コートは非常に難しく、結果として共振器内損失の低減を目指し、レーザ波長の反射率を優先したため、励起波長での透過率は低下することになった。コーティングは、応用光電研究室(株)および昭和オプトロニクス社に依頼したが、ともに同程度の品質であった。結晶の側面にインジウムシート（典型的な厚み 100 μm）を巻いて、銅製のホルダに圧着し熱的な接触を保った。銅製ホルダは、ペルチエ素子により温度を 0 から 40℃ の間で可変できる。

2 枚の分布屈折率レンズ（焦点距離 20 mm と 15 mm）により励起レーザのコリメート・集光を行った。励起径 300 μm、レーリ長 0.8 mm とし、実効励起密度 17 kW/cm² 程度とした。共振器長 50 mm、共振器出力鏡反射率 95%、曲率半径 150 mm を用いた。

図 3-33 に入出力特性の実験結果を示す。励起パワー 12 W で最大出力 3.1 W を Yb:YAG 結晶温度 20℃ において達成した。発振閾値 2.5 W（計算 2.7 W）、スロープ効率 34.6%（計算 51%）、光変換効率 27%（計算 36%）を得た。これは図 3-27 の計算結果と吸収率 90% を考慮すると比較的良く一致した。Yb:YAG 10℃ では出力 3.3 W であった。Yb の有する高い量子効率（91%）に比すると、スロープ効率はまだ低い。今後、半導体レーザのビーム品質の向上により効率改善が見込めると考える。ビーム品質は常に $M^2 < 1.2$ の TEM₀₀ モードであった。

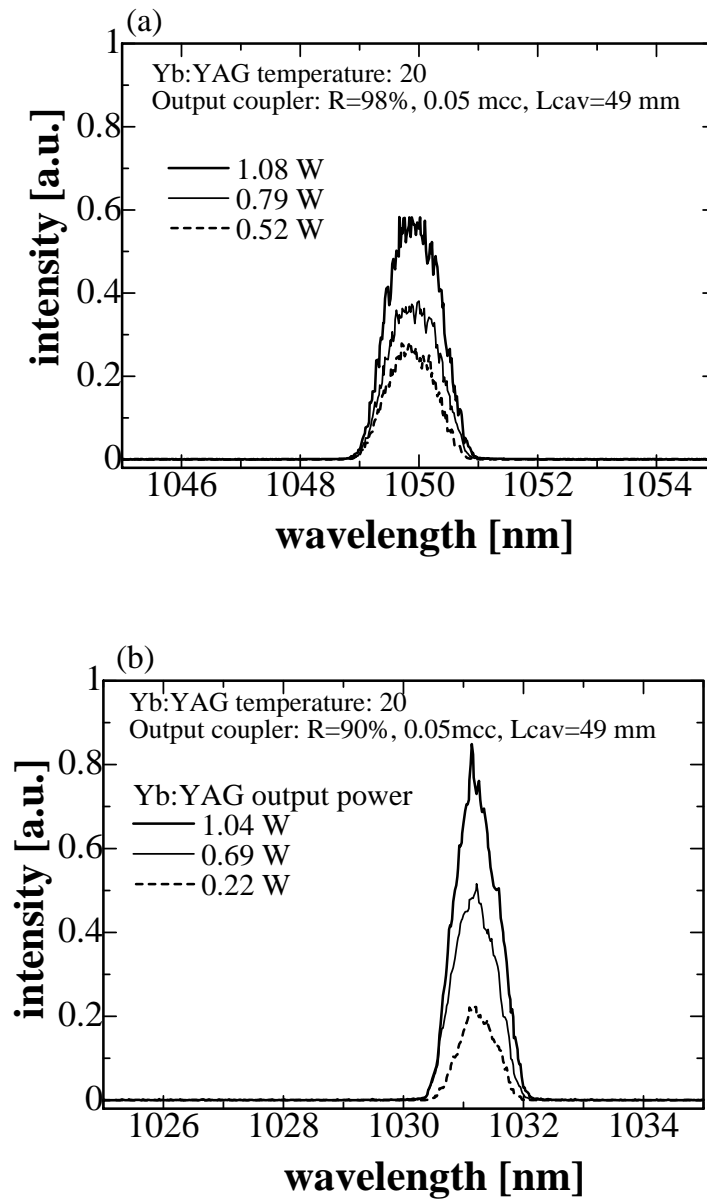


図 3-34 Yb:YAG レーザの発振スペクトル

共振器モード径は $\phi_0=150 \mu\text{m}$ であり、高いモード整合率を確保できているためである。非球面レンズ（焦点距離 $f=2 \text{ mm}$ ）による 1 枚レンズ系ファイバ結合光学系（OZ 社製）を用い、シングルモードファイバ（Flexcor1060、モードフィールド径 $6.2 \mu\text{m}$ ）に Yb:YAG レーザ光を結合した結果、ファイバ結合出力として 2.4 W を得た。ファイバ結合効率は最適状態で 90% であった。この場合のレーザ発振波長は 1050 nm であった。

図 3-34 (a), (b)に発振スペクトルを示す。特に波長選択素子を共振器内に挿入せずとも、

出力結合率を変えることで、1031 nm および 1050 nm の発振が選択できる。これは、Yb:YAG レーザではレーザ下準位数が完全に零にはならないため、出力結合率が低い場合（すなわち出力鏡反射率が高いとき）、レーザ発振閾値が高くなり 1031 nm の発振が抑制され、2 番目に誘導放出断面積の大きい 1050 nm が発振するためである。このことは、反転分布の低い状態を意味し、Yb:YAG において利得シフト効果が発現していると解釈できる。PDFA に適した 1031 nm 発振、TDFA、EYDFA に適した 1050 nm 発振が実現できることが示された。

3.7.4.2 マイクロチップ Yb:YAG レーザ

さらなる小型化を目指し、マイクロチップ Yb:YAG レーザを構成し、特性把握実験を行った。図 3-35 にマイクロチップレーザの実験構成を示す。励起密度などのレーザ設計はバルク型 Yb:YAG レーザと同一とし、Yb 添加濃度を 5 倍 (25 at.%) に高濃度化し、その代わり結晶厚みをおよそ 1/5 に、そして励起光を折り返すコーティングを結晶に施すことで、厚みをさらに半分程度 (300 μm) にすることを試みた。Yb 添加濃度と結晶長の積は一定となるので、レーザ出力としては 3.7.3 節の設計論が適用できる。実験では、3 mm 角、Yb 濃度 25 at.%, 厚み 400 μm (バルク型の 1/8) のマイクロチップ Yb:YAG 結晶を用いた。これをサファイア板に光学接着剤 (レンズボンドTM) により貼り付け、Yb:YAG 内で発熱した熱量をサファイア経由でヒートシンクに排熱した。直線状のレーザ共振器を構成し、共振器長 5 mm とした。

図 3-36 に曲率半径 150 mm の出力鏡を使用した場合の入出力特性を示す。出力鏡反射率は 90% から 99% とした。R=99% において最大出力 2.7 W、スロープ効率 33% を得た。これはマイクロチップ Yb:YAG レーザにおいて報告された最大出力である。共振器モード径は $w_0=95 \mu\text{m}$ と計算され、励起スポット径 300 μm よりも大きいため、Yb:YAG レーザは横マルチモード発振している。また励起パワー 8 W 付近で、熱によると思われる出力飽和が観測されている。これは 3 W 出力バルク Yb:YAG レーザよりも、励起体積が小さく（およそ

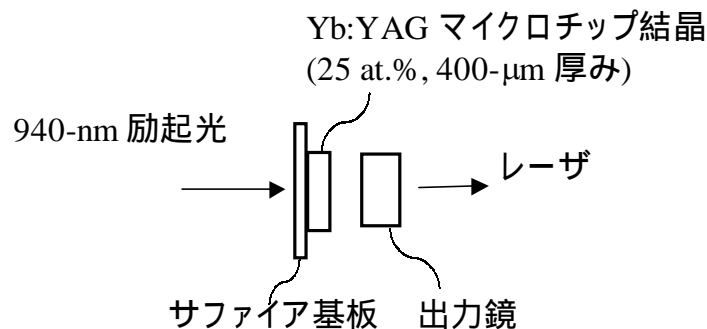


図 3-35 マイクロチップ Yb:YAG レーザの実験構成

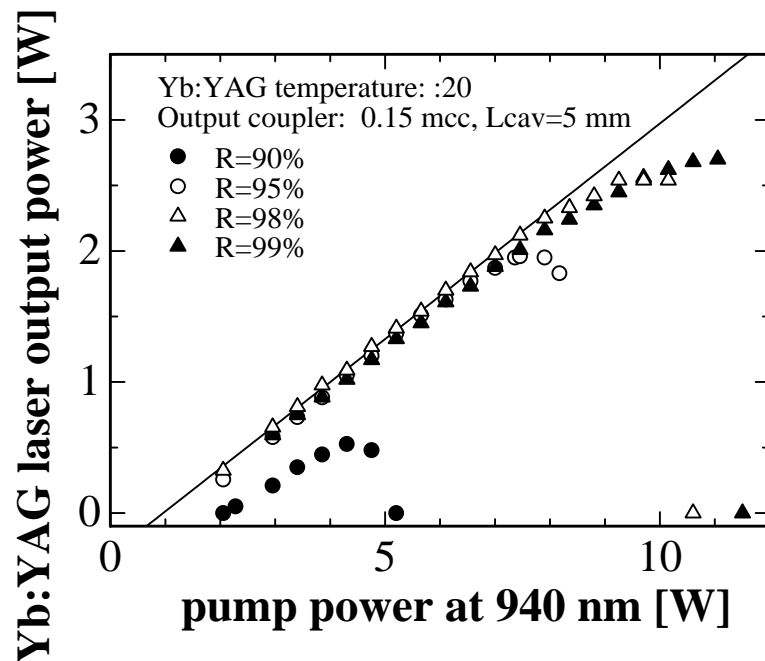


図 3-36 マイクロチップ Yb:YAG レーザの入出力特性

1/7.5) 発熱密度が大きくなるため、温度上昇と熱レンズ効果の両方が顕著になるためである。今後、排熱構成と励起体積の再検討を行うことで、高輝度なマイクロチップ Yb:YAG レーザを実現できると考えている。励起に用いた半導体レーザのサイズは現状 $16.2 \times 5 \times 4.1 \text{ cm}^3$ であるが、出力パワーレベルに応じ小型のものを使えば、さらに小型化できる。

以上の LD 励起 Yb:YAG レーザ出力特性を下表 3-7 に示す。1 W 機については本論文では述べなかったが、高効率実証機として 3 W 機の前に開発している。基本設計は 3 W 機と同じだが、励起密度が 1.5 倍高く、そのためスロープ効率 40% の高効率動作が可能となっている。

表 3-7 LD 励起 Yb:YAG レーザ出力特性（常温動作）

試作機	3W バルクレーザ	マイクロチップレーザ	1W バルクレーザ
実証目標	高出力実証機	高出力・小型実証機	高効率実証機
Yb:YAG レーザ出力	3.1 W	2.7 W	1.05 W
シングルモード ファイバ出力	2.4 W	（未測定）	700 mW
スロープ効率	35%	33%	40.2%
光/光変換効率	26%	24.5%	33%
電気/光変換効率 （冷却電力含まず）	4.8%	4.3%	14.5%
励起 LD パワー	12 W	同左	3.2 W
励起 LD 消費電力	63 W	同左	7.2 W
LD 電気/光変換効率	20%	同左	44%
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイバ結合型 LD ・水冷 ・TEM₀₀（$M^2 < 1.2$） ・出力増大可（6W 可） ・2 波長選択発振 （1031 nm/1050 nm） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイバ結合型 LD ・水冷 ・400 μm 厚み、サファ イア貼り付け ・共振器長<5 mm 	<ul style="list-style-type: none"> ・ブロードエリア 型 LD ・空冷（ペルチエ） ・TEM₀₀（$M^2 < 1.1$） ・高励起密度 （25 kW/cm²）

3.7.5 ファイバ増幅器への応用

3.7.5.1 Er, Yb 共添加ファイバ増幅器の特徴

通常の EDFA においては、第 2 章で述べたように励起波長は $0.98\ \mu\text{m}$ 帯 (FWHM $20\ \text{nm}$) と $1.48\ \mu\text{m}$ 帯 (FWHM $70\ \text{nm}$) の 2 種類に限られており、特に $0.98\ \mu\text{m}$ 励起では励起波長幅が狭いため、励起レーザの選択性が低い。Er ファイバに Yb を増感材として共添加することで励起波長の選択範囲を大幅に広げることができる。Er, Yb 共添加ファイバにおける Yb のエネルギー準位構造は以下のような特徴と役割を持つ[37, 45]。

- (1) 励起波長領域の拡大：Yb イオンは、ガラス媒質中に存在することで、 $850\sim 1100\ \text{nm}$ 帯に非常にブロードな吸収スペクトルを持つ。励起光源波長の広範囲な選択性が増幅器設計に大きな自由度を与え、用途に応じた最適設計を可能とする。
- (2) $\text{Yb}^{3+}\text{Er}^{3+}$ のエネルギー移乗過程：励起準位である Yb の $^2\text{F}_{5/2}$ 準位は、Er の $^4\text{I}_{11/2}$ 準位とエネルギー値が近いことから密に結合しており、エネルギー移乗が比較的高速に行える。特に逆過程 (Er \rightarrow Yb) を抑制するため、フォノンエネルギーの大きなガラス (例えば燐酸ガラス) をホストとすることで、Yb と結合している Er の $^4\text{I}_{11/2}$ 準位の非放射寿命を縮めている。このため Er イオンは取り囲んでいる Yb イオン (Er の 10 倍程度の濃度) から、高効率でエネルギーを獲得することができる[45]。

3.7.5.2 Yb:YAG レーザ励起 Er, Yb ファイバ増幅器の動作特性

Nd:YLF ($1047\ \text{nm}$) や Nd:YAG ($1064\ \text{nm}$) による励起動作の報告例はあるが、Yb:YAG ($1031, 1050\ \text{nm}$) での例は無く、ファイバ増幅器の最適動作点の探索から始める必要がある。実験的にファイバ長最適化を行うことから開始した。表 3-8 に用いた Er, Yb 共添加ファイバ (IRE ポーラス社製) の仕様を示す。

表 3-8 Er, Yb 共添加ファイバ仕様

添加濃度	Er: 300 ppm, Yb: 6000 ppm
カットオフ波長	$1250\ \text{nm}$
コア直径	$5\ \mu\text{m}$
モードフィールド径	$8\ \mu\text{m}$
NA	0.2

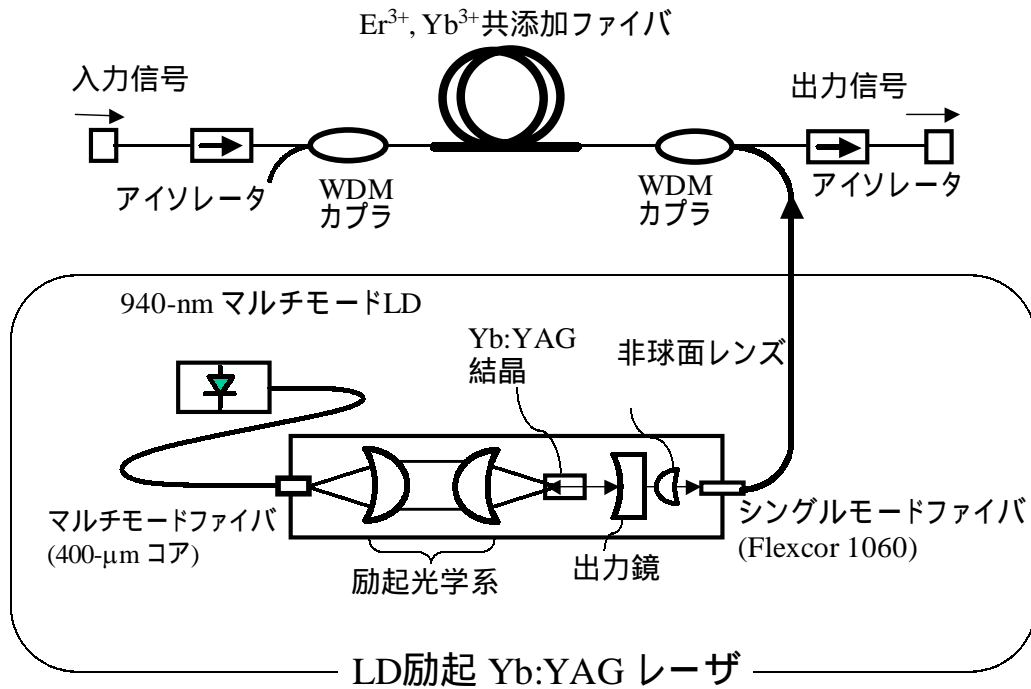


図 3-37 Yb:YAG レーザ励起 Er, Yb 共添加ファイバ増幅器

種々のファイバ長 (2~10 m) を用いた予備実験を行い、450 mW 励起においてファイバ長 6 m で最大出力 150 mW (閾値 60 mW、スロープ 36.8%) を得ることができた。励起パワー 3 W で最大出力を得るためのファイバ長の最適値は、より長尺側の 15 m 近傍と推測される。

これらの予備実験を基に、3 W 出力バルク Yb:YAG レーザを励起光源とし、Er, Yb 共添加ファイバ増幅器の高飽和出力動作を行った。図 3-37 に Yb:YAG レーザ励起 Er, Yb ファイバ増幅器の実験構成を示す[34]。ファイバ長 15 m、1 段構成、後方励起とした。高飽和出力動作を実現するため、波長多重カプラを介して後方励起構成とした。ファイバ増幅器の蓄積エネルギーを完全に抽出するため、入力信号パワーを +7.7 dBm (1545 nm) と十分に高パワーとした。1530~1560 nm において予備的に信号波長を走査し、1545 nm において増幅器出力最大を得た。図 3-38 に増幅器出力特性を示す。最大出力 850 mW (+29.3 dBm)、スロープ効率 36.2% を達成した。本スロープ効率は、Nd:YLF レーザなどを用いた既報告文献値[46] とほぼ同程度であり、Yb:YAG レーザ励起においても、十分に高い Yb → Er へのエネルギー移乗効率を実現できていると言える。また増幅器出力の飽和は観測されなかった。

ここで更なる増幅器の高出力化の可能性を検討する。ファイバ増幅器における出力は、ファイバ内での熱的問題 (温度上昇、熱歪み) や非線形光学効果 (誘導ブリルアン散乱等) 等で制限されると考えられる。現在、ファイバレーザやファイバ増幅器において出力 2 W 以上が得られており、本実験構成においても動作条件の最適化 (長尺化、多段増幅器構成)

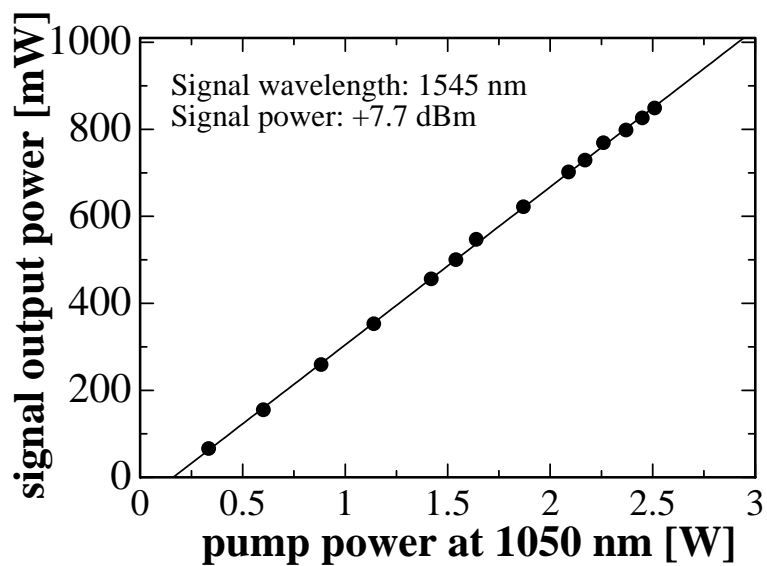


図 3-38 Yb:YAG レーザ励起 Er, Yb 共添加ファイバ増幅器の増幅器出力

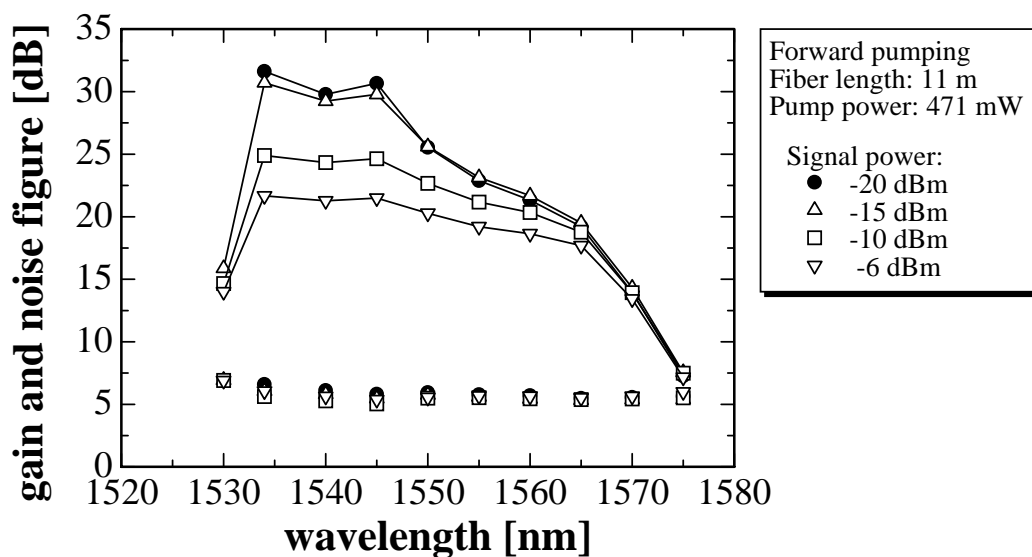


図 3-39 Er, Yb 共添加ファイバ増幅器の利得と雑音指数の波長依存性

を図る事で、励起パワーの増大により同程度以上の出力が達成可能と思われる。

図 3-39 に、前方励起の場合の利得と雑音指数の波長依存性を示す。小信号 (-20 dBm) では利得 30 dB 以上、雑音指数は 5 dB 程度と良好であった。表 3-9 に以上の増幅器動作特性のまとめを示す。

表 3-9 Yb:YAG レーザ励起 Er, Yb 共添加ファイバ増幅器動作特性

項目	特性	備考
飽和出力	850 mW (+29.3 dBm)	後方励起、入力信号 +7.7 dBm@1545 nm
利得	32 dB	最大
雑音指数	5 dB	前方励起
光/光変換効率	35%	
スロープ効率	36.2%	
ファイバ長	15 m	

3.7.6 実用装置への展望 - 装置寿命 -

10 W クラスの 940 nm マルチモード LD の寿命は、およそ 5 万時間 (MTBF; Mean time between failure、ML; median life とともに) [47]である。このため 940 nmLD 励起 YAG レーザを利得シフト TDFA や Er, Yb 共添加ファイバ増幅器などの励起光源としたとき、装置寿命の要求値 10 万時間に到達していない。そこで励起 LD において、(1) 低パワー動作による寿命伸長 : 20 W 出力の LD (寿命 4 万時間) を 10 W で使用 推定 16 万時間、(2)長寿命 LD の使用 : 1 W 出力の LD (寿命 79 万時間) を 8 個使用 全体寿命は約 10 万時間と推定できる、などが装置寿命の延長手法として考えられる。現状でマルチモード LD の寿命データは、メーカによりまちまちで統一的な比較が出来ない。より正確な寿命推定は今後の課題である。

3.8 まとめ

本章において、ツリウム添加ファイバ増幅器に対し低雑音励起方式を適用した結果を詳しく述べた。まず反転分布、利得および雑音指数の理論計算を行い、従来型の 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA と低雑音励起利得シフト TDFA の動作の違いを明確化した。次に、光前置増幅を意識した小信号動作、中継増幅を意識した波長多重信号増幅の特性を明らかにした。特に光伝送システムへの応用の際に重要となる利得平坦動作も行った。そして変調速度 10 Gb/s での光前置増幅受信を行い、利得シフト TDFA において過剰雑音は発生していないことを確認し、光伝送への適用に致命的な問題は無いことが示された。また、TDFA、Pr 添加ファイバ増幅器、Er, Yb 共添加ファイバ増幅器などの励起光源として適する波長 1.05 μm 帯の高出力光源として、新たに LD 励起 Yb:YAG レーザを開発し、利得シフト

TDFA と Er, Yb 共添加ファイバ増幅器へ適用することでその実用性を実証した。Yb:YAG レーザのマイクロチップ化により、ほぼ半導体レーザと同様の小型サイズながら、1.05 μm 帯のワット級高出力光源を提供できることを示した。

本章で得られた主要な結果を以下に示す。

(1) 低雑音励起利得シフト TDFA および 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA の反転分布、利得、雑音指数の挙動を計算し、1.05 μm 励起 TDFA は基本的に 4 準位系、低雑音励起利得シフト TDFA は 3 準位系に近い動作をすることを示した。したがって、従来型 TDFA では利得シフトが困難であることが示された。

(2) 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA における雑音指数は、高励起状態で量子限界 3 dB に極めて近い。しかし僅かに 0.1 ~ 0.5 dB 程度劣化することが分かった。Tm ファイバ中の下準位数密度が零にならずおよそ 0.7% 残留するからである。

(3) 低雑音励起 (1.05 μm /1.56 μm) TDFA において、1.56 μm 励起光の導入により、平均反転分布率が低減し、1.49 μm 帯への利得の長波シフトが起こることが計算上で再現でき、実験と傾向が合致した。また 1.05 μm /1.56 μm 励起 TDFA は「低雑音」という特徴があることが計算で裏付けられた。

(4) 数値計算結果は概ね実験結果と一致する。特に 1.05 μm アップコンバージョン励起においては、利得、雑音指数の励起パワー依存性は絶対値まで 0.5 dB 程度で合致することが示された。低雑音励起利得シフト TDFA では全般的な傾向が合致した。今後、物性定数の詳細なデータが利用可能になれば、さらに計算精度が向上するものと考えられる。

(5) 小信号増幅では、Tm ファイバ長 60 m を用いることで、波長 1475~1510 nm において高利得 (>25 dB) 低雑音 (<5 dB) の利得シフト動作が実現できた。

(6) 波長多重信号増幅では、波長 1478~1505 nm において、利得 >20 dB、雑音指数 <7 dB、増幅器出力 20.1 dBm、光/光変換効率 9.1% を得た。

(7) 本励起方式での光/光変換効率について考察し、その制限要因と改善策を示した。最も効果的と考えられるのは、励起光子エネルギーと信号光子エネルギーの不整合を小さくすることと緑青色蛍光の抑制である。

(8) 光波長多重伝送において重要な設計因子である利得平坦特性を測定した。総入力信号パワー -10 ~ +5 dBm、波長帯域 1476.8~1508.4 nm (帯域幅 31.6 nm) において、利得平坦度 $< \pm 1.5$ dB を達成した。

(9) 第 2 励起光として 1.56 μm 半導体レーザを用いた伝送実験用低雑音励起利得シフト TDFA 装置を作製した。

(1 0) ファイバ増幅励起光源として LD 励起 Yb:YAG レーザの基本設計、試作を行い、出力 3 W 級の実証、レーザ発振波長 1031 nm、1050 nm の選択発振、マイクロチップ結晶(400 μm 厚み) による小型化を実証した。またこれを励起光源として、利得シフト TDFA ならびに Er, Yb 共添加ファイバ増幅器へ適用した。前者では、既存光源の Yb:ファイバレーザと同等の増幅特性を、後者では、出力 850 mW (+29.3 dBm) 級の高出力ファイバ増幅器を実証した。

参考文献

- [1] C. R. Giles and E. Desurvire, "Modeling erbium-doped fiber amplifiers," J. Lightwave Technol., vol. 9, no. 2, pp. 271-283, 1991.
- [2] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology*, Academic Press, Chapter 6, 1999.
- [3] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapter 5, 1994.
- [4] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, "Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm ," IEEE J. Quantum Electron., vol. 31, no. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [5] T. Sakamoto, S. Aozasa, T. Kanamori, K. Hoshino, M. Yamada, and M. Shimizu, "Gain-equalized thulium-doped fiber amplifiers for 1460 nm-band WDM signals," in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA'99)*, paper WD2, 1999.
- [6] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "1.49- μm -band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for WDM transmission systems," IEEE J. Lightwave Technol., *accepted for publication*.
- [7] アンリツ、「アプリケーションノート 光増幅器 (EDFA) の測定」, 1997 年.
- [8] M. Kakui and S. Ishikawa, "Long-wavelength-band optical amplifiers employing silica-based erbium doped fibers designed for wavelength division multiplexing systems and networks," IEICE Trans. Electron., vol. E83-C, no. 6, pp. 799-815, 2000.
- [9] M. J. F. Digonnet, "Theory of operation of laser fiber devices," in *Rare earth doped fiber lasers and amplifiers*, ed., M. J. F. Digonnet, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [10] 須藤昭一編、「エルビウム添加光ファイバ増幅器 ～情報通信ネットワークに革命をもたらすキーデバイス～」, オプトロニクス社、第 1 部第 1 章、1999 年.
- [11] W. J. Lee, B. Min, J. Park, and N. Park, "Study on the pumping wavelength dependency of S⁺-band fluoride based thulium doped fiber amplifiers," OFC2001, paper TuQ5, 2001.

- [12]R. M. Percival and J. R. Williams, "Highly efficient 1.064 μ m upconversion pumped 1.47 μ m thulium doped fluoride fibre amplifier," Electron. Lett., vol. 30, no. 20, pp. 1684-1685, 1994.
- [13]S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi, and M. Shimizu, "Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, no. 10, pp. 1331-1333, 2000.
- [14]A. Chandonnet and P. Laperle, "Photodegradation of fluoride glass blue fiber laser," SPIE vol. 2998, pp. 70-81, 1997.
- [15]Y. Nishida, K. Fujiura, K. Hoshino, M. Shimizu, M. Yamada, K. Nakagawa, and Y. Ohishi, "Reliability of fluoride fiber module for optical amplifier use," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 12, pp. 1596-1598, 1999.
- [16]大石泰丈、「ニューガラスハンドブック」, 丸善、第8章、pp. 257-267、1991年.
- [17]S. G. Grubb, W. H. Humer, R. S. Cannon, S. W. Vendetta, K. L. Sweeney, P. A. Leilabady, M. R. Keur, J. G. Kwasegroch, T. C. Munks, and D. W. Anthon, "+24.6 dBm output power Er/Yb codoped optical amplifier pumped by diode-pumped Nd:YLF laser," Electron. Lett., vol. 28, no. 13, pp. 1275-1276, 1992.
- [18]M. Yamada, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Ohishi, Y. Terunuma, K. Oikawa, H. Yoshinaga, K. Kikushima, Y. Miyamoto, and S. Sudo, "Low-noise and high-power Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, no. 8, pp. 869-871, 1995.
- [19]M. Yuda, T. Sasaki, J. Temmyo, M. Sugo, and C. Amano, "High-power, highly reliable 1.05 μ m InGaAs strained quantum well laser diodes as pump sources for thulium-doped fibre amplifiers," Electron. Lett., vol. 38, no. 1, pp. 45-46, 2002.
- [20]Laser Focus World 2002 Buyers Guide Optoelectronics Industry Sourcebook, pp. 152-157.
- [21]ノートル社ホームページ <http://www.nortelnetworks.com/>
- [22]IRE ポーラス社ホームページ <http://www.ipgphotonics.com/>
- [23]H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber, and J. M. Dawes, "Ytterbium-doped silica fiber lasers: Versatile sources for the 1-1.2- μ m region," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., vol. 1, no. 1, pp. 2-13, 1995.
- [24]アンリツ社カタログ
- [25]H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byren, "Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers," IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., vol. 3, no. 1, pp. 105-116, 1997.
- [26]A. A. Kaminskii, *Laser Crystals: Their physics and properties*, 2nd ed., Springer-Verlag, Chapter

- 4, 1990.
- [27] 櫛田孝司、「光物性物理学」、朝倉書店、第6章、p. 187、1991年。
- [28] W. J. Miniscalco, "Optical and electronic properties of rare earth ions in glasses," in *Rare earth doped fiber lasers and amplifiers*, ed., M. J. F. Digonnet, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [29] A. R. Reinberg, L. A. Riseberg, R. M. Brown, R. W. Wacker, and W. C. Holton, "GaAs:Si LED pumped Yb-doped YAG laser," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 19, no. 1, pp. 11-13, 1971.
- [30] P. Lacovara, H. K. Choi, C. A. Wang, R. L. Aggarwal, and T. Y. Fan, "Room-temperature diode-pumped Yb:YAG laser," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 14, pp. 1089-1091, 1991.
- [31] T. Y. Fan and R. L. Byer, "Diode laser-pumped solid-state lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 6, pp. 895-912, 1988.
- [32] T. Y. Fan and J. Ochoa, "Tunable single-frequency Yb:YAG laser with 1-W output power using twisted-mode technique," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 1137-1138, 1995.
- [33] T. Taira, J. Saikawa, T. Kobayashi, and R. L. Byer, "Diode-pumped tunable Yb:YAG miniature lasers at room temperature: modeling and experiment," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 100-104, 1997.
- [34] T. Kasamatsu, T. Sumiyoshi, and H. Sekita, "Laser-diode-pumped Yb:YAG laser as a new pump source and its application to an Er^{3+} , Yb^{3+} -codoped high-output-power fiber amplifier," *Appl. Phys. B.*, vol. 69, pp. 491-495, 1999.
- [35] U. Brauch, A. Giesen, M. Karszewski, Chr. Stewen, and A. Voss, "Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018 and 1053 nm," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 713-715, 1995.
- [36] 大石泰丈、「 $1.3\mu\text{m}$ 帯フッ化物ファイバアンブ」、レーザー研究、第25巻第2号、pp. 139-146、1997年。
- [37] W. L. Barnes, S. B. Poole, J. E. Townsend, L. Reekie, D. J. Taylor, and D. N. Payne, " Er^{3+} - Yb^{3+} and Er^{3+} doped fiber lasers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 10, pp. 1461-1465, 1989.
- [38] T. Y. Fan, "Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 1457-1459, 1993.
- [39] T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano, "Temperature dependence and optimization of 970-nm diode-pumped Yb:YAG and Yb:LuAG lasers," *Appl. Opt.*, vol. 38, no., 24, pp. 5149-5153, 1999.
- [40] T. Y. Fan and R. L. Byer, "Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser," *IEEE J. Quantum, Electron.*, vol. 23, no. 5, pp. 605-612, 1987.
- [41] 平等拓範、「レーザービーム品質測定の基礎」、レーザー研究、第26巻第10号、pp. 723-729、

1998 年.

[42]A. Yariv 著、多田邦雄、神谷武志訳、「光エレクトロニクスの基礎」、丸善、第 2 章、1988 年.

[43]A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books, Mill Valley, Chapter 20, 1986.

[44]笠松直史、関田仁志、森重幸雄、「アクティブミラー方式 LD 励起 Nd:YAG レーザー」、レーザー研究、第 24 巻第 3 号、pp. 373-379、1996 年.

[45]J. E. Townsend, W. L. Barnes, K. P. Jedrzejewski, and S. G. Grubb, “Yb³⁺ sensitized Er³⁺ doped silica optical fibre with ultrahigh transfer efficiency and gain,” *Electron. Lett.*, vol. 27, no. 21, pp. 1958-1959, 1991.

[46]S. G. Grubb, D. J. DiGiovanni, J. R. Simpson, W. Y. Cheung, S. Sanders, D. F. Welch, and B. Rockney, “Ultrahigh power diode-pumped 1.5-μm fiber amplifiers,” *OFC’96*, paper TuG4, 1996.

[47]例えば、SDL 社カタログ

第4章 高効率半導体レーザー励起方式 利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器

4.1 まえがき

本章では、第2章に述べた利得シフト TDFA を実現するもう一つの2波長励起方式、すなわち高効率励起式 ($1.4\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$) について述べる。この方式は、TDFA において極めて高い光/光変換効率[29.3%、低雑音励起方式 ($1.05\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$ 励起) の3.2倍]を実現し、かつ市販の半導体レーザーを励起光源とすることが出来るという特長を持っている。ただし第3章に述べた低雑音励起方式に比べ、本質的に雑音指数が劣化することが理論的にも実験的にも明らかにされ、適用領域によっては、第3章の低雑音励起方式との複合形態を取る方が望ましいことも、本研究で分かった。

まず本方式の発案指針を述べた後、数値モデルによる反転分布の解析を行う。その後、小信号増幅、波長多重信号増幅の実験結果について動作特性を詳細に述べる。また信頼性や高速伝送時に深刻な課題となる偏波モード分散について述べる。

4.2 高効率半導体レーザー励起方式の発案指針

第2章にて高効率半導体レーザー励起方式の概要を多少天下りの的に述べた。ここで、その

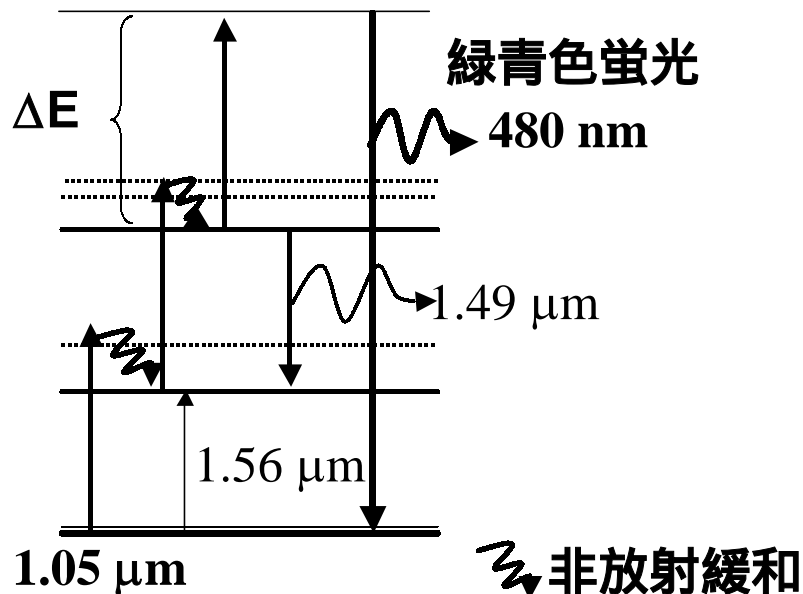


図 4-1 低雑音励起方式の損失過程

発案に至った指針を簡単に述べる。特に、反転分布を形成する第1励起光として、波長 1.4 μm が波長 1.05 μm に比べ、なぜ高効率が実現できるかということを中心に述べる。

第3章 3.4.4.3 節で、低雑音励起方式の 1.05 μm /1.56 μm 励起 (図 4-1) では、低い光/光変換効率 (9.1%) しか得られなかったことを述べた。この理由を第3章では、

- (1) 非放射緩和過程: 励起光子エネルギー $h\nu_p$ と信号光子エネルギー $h\nu_s$ の差が大きい
ため、格子振動にエネルギーを奪われる (図 4-1 の波線)。
- (2) 背景損失: 利得シフト TDFA の実現のため、比較的長いファイバ長 (60 m) が必要
であることに起因する。
- (3) 基底状態吸収: 励起されていない残余 Tm イオンによる基底状態吸収 ($^3\text{H}_6$ $^3\text{H}_4$ 、
波長 1.50 μm より長波側) がある。
- (4) 緑青色蛍光: 図 4-1 に示すように、1.05 μm 励起光により $^1\text{G}_4$ 準位へ励起され、 $^1\text{G}_4$
 $^3\text{H}_6$ の緑青色遷移 (アップコンバージョン過程) によりエネルギーが散逸する。

に分類した。この中で、まず (1) が最も可能性が高く、次に (4) が疑わしいことを述べた。つまり非放射緩和過程を低減し、さらに緑青色蛍光の少ない励起方式を採用する必要があるという論理的帰結であった。

そこで、高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm 励起) を発案した。まず効率を上げるために最も効果的と考えられる (1) を解決すべく、励起光子エネルギーと信号光子エネルギーを近接させることを考えた。ただし条件として、反転分布を形成するため、励起波長は信号波長より短い必要がある [条件 (1)] また (4) を解決するために、励起波長は 1.2 μm より大きいか、1.0 μm より小さい必要がある [条件 (2)] これは $^1\text{G}_4$ 準位に励起されない条件である。これらと、半導体レーザとして実現可能な条件として、波長 0.8~1.02 μm または 1.3~1.6 μm という条件 (3) を鑑みると、必然的に励起波長 1.4 μm 帯が選ばれる。図 4-2 に Tm イオンの $^3\text{H}_4$ 準位と $^3\text{F}_4$ 準位の間の誘導遷移を改めて示す (図 2-8 と同じ)。この図から、1.4 μm 帯は $^3\text{H}_4$ 準位から $^3\text{F}_4$ 準位への励起状態吸収遷移のほぼピークに相当することが分かる。

ただし $^3\text{H}_4$ 準位に Tm イオンを供給するために 1.56 μm 励起が必要である。本励起方式は、アップコンバージョン励起の持つ 2 つの役割 (Tm イオンをレーザ下準位 $^3\text{H}_4$ へ供給することと反転分布形成) を別々の波長に割り当て、それぞれが励起 LD として実現可能な波長とすることに相当する。波長 1.4 μm の高出力半導体レーザは 1.48 μm 半導体レーザ技術の援用で容易に作製可能で市販されており、また光部品も豊富である。

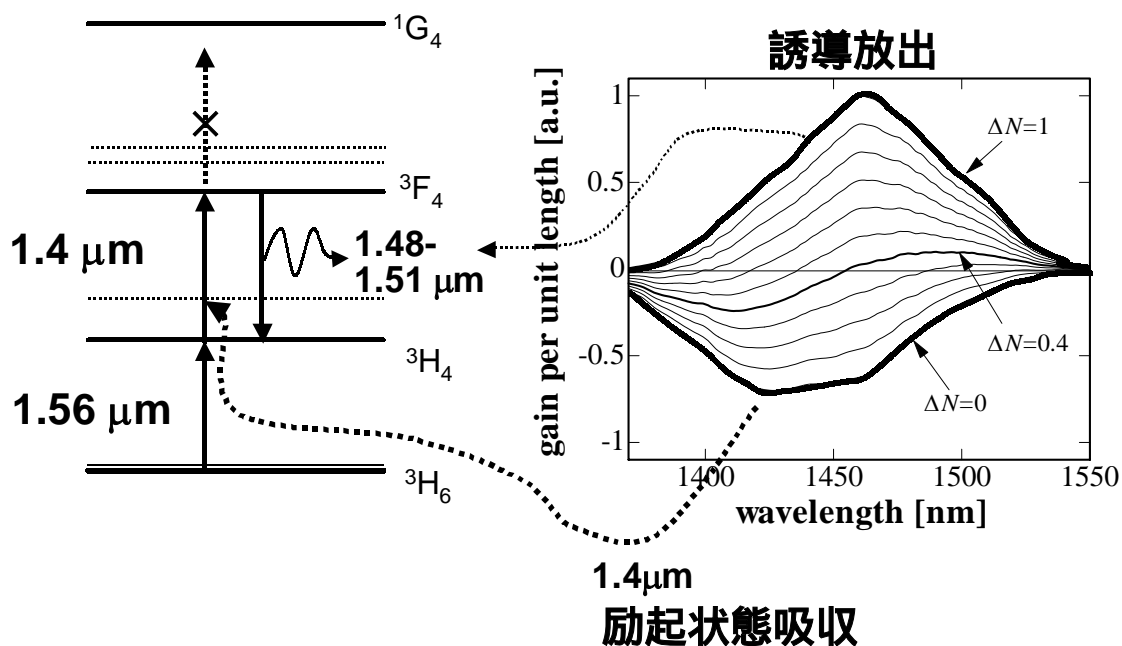


図 4-2 高効率半導体レーザ励起方式（1.4 μm /1.56 μm 励起）の説明図

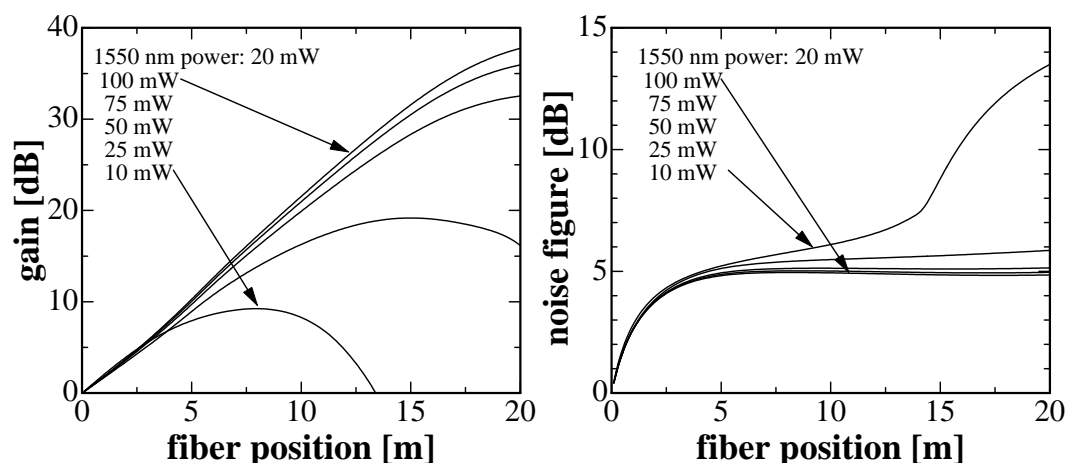


図 4-3 高効率励起における利得、雑音指数のファイバ位置依存性（計算結果）

4.3 反転分布の数値解析

高効率半導体レーザ励起方式（以下では高効率励起方式と略す）の反転分布の特徴的な振る舞いを説明する。この励起方式では第 3 章での低雑音励起に比べ、本質的に高効率化できること、ただし雑音指数に関しては 1~2 dB ほど劣化することが、本節で述べる計算結果において初めて明らかになった。

第 2 章の 2.3.4 節において述べた数値計算モデルを用いる。図 4-3 に利得（左）雑音指数（右）の Tm ファイバ位置依存性の計算結果を示す。1.56 μm （ここでは 1.55 μm ）励起パワ

ーは 20 mW 固定とし、1.405 μm 励起パワーを 10 mW から 100 mW まで増大させた。信号波長 1470 nm、信号パワー -30 dBm とした。

図 4-3 の利得特性から、高効率励起 TDFA は明白に 3 準位的な振る舞いをしていることが分かる。つまり、励起パワーが低いとき (10~25 mW)、ファイバ長 8 m あるいは 15 m くらいで利得は最大値を取ることが分かる。また低雑音励起よりも低い励起パワーである 50 mW (1.4 μm) において、高利得 (~30 dB) が得られていることも分かる。このことが、本励起方式で高効率動作が可能であることの第 1 の理論的確認である。また雑音指数は最初の 4 m ほどを過ぎると、ほぼ 5 dB に漸近していくことも判明した。低雑音励起が量子限界 3 dB に漸近するのに比べ、2 dB ほど劣化している。

これらの特性は、第 3 章の 1.05 μm アップコンバージョン励起方式とは全く異なる様相である。さらに低雑音励起方式 (1.05 μm /1.56 μm) よりも、さらに際立った 3 準位的な様相を呈している。図 3-2 を参照すれば違いが良く分かる。つまりこれらの 3 方式は順に、1.05 μm アップコンバージョン励起方式 (ほぼ 4 準位) 低雑音励起方式 (1.05 μm /1.56 μm 、3 準位系に近い) 高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm 、極めて 3 準位系に近い) という関係になる。この理由は以下のように考えられる。1.56 μm 励起光がレーザ下準位 $^3\text{H}_4$ に Tm イオンを供給するが、低雑音励起方式では、1.05 μm 励起光が $^3\text{H}_4$ 準位に強く相互作用し、下準位イオン数を減少させる遷移強度が大きいことに起因する。遷移断面積で比較すると、 $\sigma_{P2}/\sigma_{P1a}=4.9$ であるので、5 倍ほど大きいことも指摘できる。

図 4-4 に局所反転分布率の Tm ファイバ位置依存性を示す。1.405 μm 励起光パワー 100 mW、1.56 μm 励起光パワー 40 mW において、平均反転分布率は 0.609 であった。また同図より、平均反転分布率だけでなく、ファイバ入射端でも局所反転分布率は 0.6 程度と低いことが分かる。低雑音励起の場合、局所反転分布率はファイバ入射端では 0.9 以上、平均反転分布率も 0.754 であったのに対し (図 3-3 スペクトル b)、高効率励起ではファイバ全域において反転分布率がかなり低いことが示された。このことが 3 準位的な振る舞いの本質的な理由である。

また雑音指数も反転分布率の低さが起因して大きな値である。これは図 3-2 と比較し、際立った違いである。この理由は以下のように説明できる。すなわち McCumber の理論により、2 準位間の励起・増幅動作における最良の雑音指数は、次式(4-1)で表される。ただしこれはファイバ増幅器を、空間的に単一の反転分布を有する増幅器と仮定したときの理想的な値であるため最小値の評価にのみ使用する[1]。

$$NF_{\min} = \frac{2}{1 - \exp\left[-\frac{h(\nu_P - \nu_s)}{kT}\right]} \quad (4-1)$$

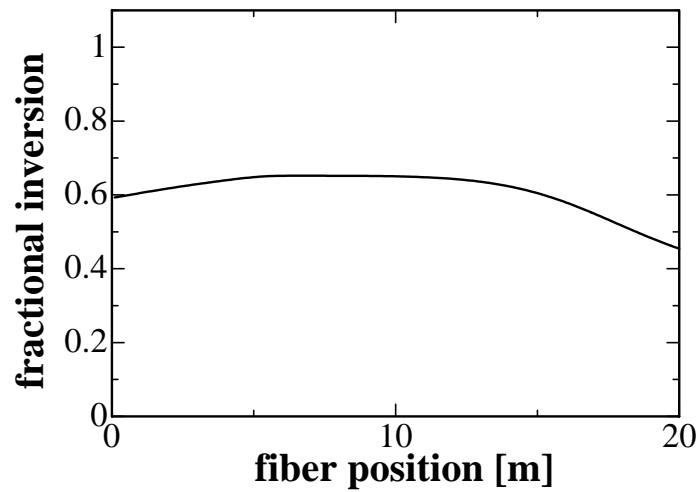


図 4-4 高効率励起利得シフト TDFA の反転分布率のファイバ位置依存性（計算結果）

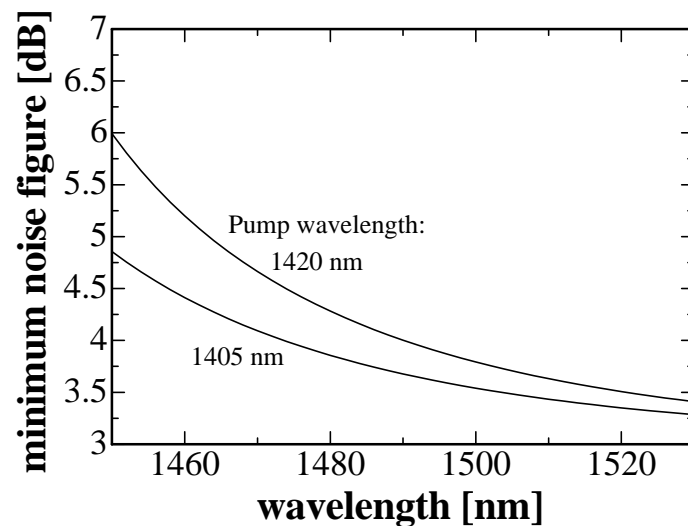


図 4-5 高効率励起利得シフト TDFA における最良雑音指数の波長依存性（計算結果）

(4-1)式を計算し、高効率 LD 励起方式で理論的に得られる最良雑音指数の波長依存性を図 4-5 に示す。信号波長 1470 nm、励起波長 1405 nm の場合、最良雑音指数 4.1 dB、励起波長 1420 nm の場合 4.7 dB 程度になることが分かる。1405 nm 励起において雑音指数が良い理由は、下準位数密度をより低減できるからで、EDFA における 0.98 μm 励起 (NF=3 dB) と 1.48 μm 励起 (NF=5 dB) の差異と類似の現象である。なお 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA では、励起波長と信号波長が十分に離隔しているため、量子限界（ビート雑音限界）に近い雑音指数が得られることに注意する。なお第 3 章(3-1)式でも示したように、最良雑音指数は次式でも表される。

$$NF_{\min} = \min\left(\frac{N_3}{N_3 - N_1}\right) \quad (4-2)$$

そこで $N_3=0.6$ 、 $N_1=0.4$ とすると、 $NF_{\min}=4.8$ dB になり、簡易な見積もり(4-1)および(4-2)式と計算機による数値計算結果の図 4-3 は概ね一致することが分かる。ただし、波長信号帯域をより長波側の $1.49 \mu\text{m}$ 帯(利得シフト帯域 $1480\sim 1510 \text{ nm}$)とした場合、雑音指数は 1470 nm より減少する。 $1.49 \mu\text{m}$ 帯の最悪雑音指数は、波長 1480 nm で得られ、 1405 nm 励起では 3.9 dB 、 1420 nm 励起では 4.3 dB であり、ともに量子限界から 1 dB ほど上昇する。

4.4 実験構成

第 3 章に述べた低雑音励起方式と同様に、波長可変光源を用いた信号光 ($-30 \text{ dBm}\sim -20 \text{ dBm}$) を利得シフト TDFA に入力し、波長走引することで、利得、雑音指数を測定した。励起光 ($1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.56 \mu\text{m}$) を、波長多重カプラを用いて Tm ファイバに入射した。また飽和信号光として、DFB 半導体レーザを用いた 16 波 (または 32 波) の波長多重信号光を用いた。典型的には、 -15 dBm/ch 、波長 $1476\sim 1509 \text{ nm}$ 、周波数 300 GHz 間隔とした。飽和信号の全パワーは、実際の波長多重伝送で用いられる入力信号パワーレベルと同程度の -3 dBm とした。用いた Tm ファイバモジュールは第 3 章と同じである (Tm 添加濃度 2000 ppm)。ただしファイバ長は $13.7\sim 40 \text{ m}$ を試した。必要に応じて、複数のモジュールを縦列接続した。なお励起波長 $1.4 \mu\text{m}$ 帯において、絶対波長は厳密に規定されたものではなく、実験では $1.393\sim 1.42 \mu\text{m}$ でほぼ同等の利得特性が得られた。また励起波長 $1.45 \mu\text{m}$ では全く増幅動作が得られなかった。これらの増幅動作の励起波長依存性は、Tm イオンにおける $^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{F}_4$ 励起状態吸収の波長依存性に起因するものと考えられる。この励起状態吸収は $1.415 \mu\text{m}$ 近傍にピークを持つことが図 4-2 より分かる。

古河電工製 $1.4 \mu\text{m}$ 半導体レーザ (波長 1405 nm または 1420 nm 、最大出力 190 mW 、スペクトル幅 $<3 \text{ nm}$) を第 1 励起光として用いた。この半導体レーザはファイバ・ブラッグ回折格子により、波長安定化および狭窄化されている。第 2 励起光 $1.56 \mu\text{m}$ には、第 3 章と同様、 $1.56 \mu\text{m}$ 帯 DFB-LD と EDFA の組み合わせを用いた。 $1.56 \mu\text{m}$ 励起パワーは 80 mW 以下であり、市販の 100 mW 級 $1.56 \mu\text{m}$ ファブリーペロ型半導体レーザを用いることが出来る。

4.5 増幅特性と考察

4.5.1 増幅自然放出光のスペクトル

第3章と同様、ASEの観測から開始した。図4-6にASEスペクトルを示す。Tmファイバ20 mを用い、前方励起構成、単一信号（波長1490 nm、-20 dBm）を入力した。励起光1.4 μm と（1405 nm）1.56 μm のパワーをそれぞれ、両方零（スペクトルa）1.56 μm のみ（励起パワー15 mW、スペクトルb）1.4 μm のみ（励起パワー57 mW、スペクトルc）1.4 μm と1.56 μm ともに入射の場合（スペクトルd）とした。1.4 μm のみのスペクトルcでも僅かに利得（1 dB）があるが、1.56 μm を入射することで利得が大きく増加し、20 dB程度の利得が得られていることが分かる。と同時に、1.4 μm 光のパワーが消費されている。この特性は1.05 μm アップコンバージョン励起あるいは低雑音励起TDFAとは異なる様相である。すなわち1.05 μm 励起の場合、1.05 μm のみで高利得を達成できるが、本励起方式では1.4 μm のみでは高い利得が得られない。1.56 μm 光の入射により初めて利得が得られる。これは図4-2において、 $^3\text{H}_6$ から $^3\text{H}_4$ 準位への励起が無い場合、 $^3\text{F}_4 - ^3\text{H}_4$ 準位間に反転分布がほとんど形成できないことを意味している。したがって本励起方式での利得シフトTDFA動作の最適化は、低雑音励起TDFAとも異なることに注意されたい。

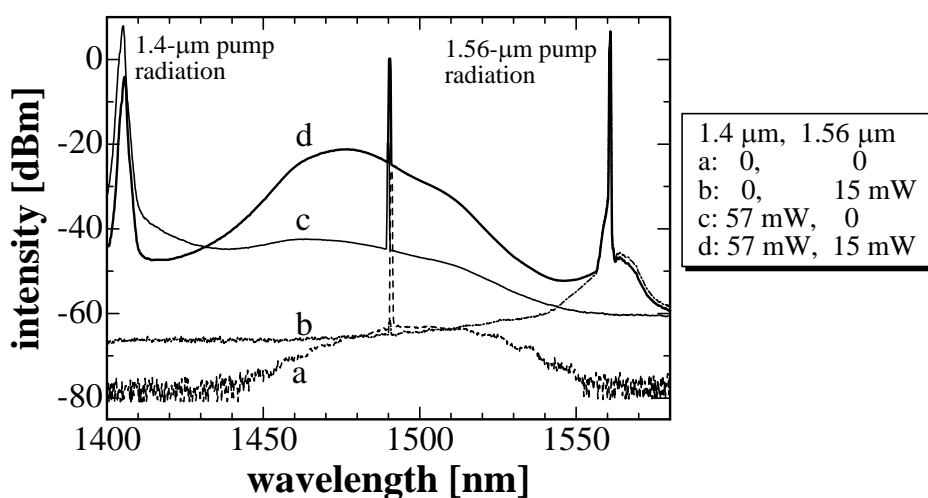


図4-6 高効率励起TDFAにおけるASEスペクトル

4.5.2 基本増幅特性

4.5.2.1 増幅器構成

高効率励起方式の基本的な振る舞い（励起パワーや信号パワー依存性など）を探るため、理論的にも把握しやすく、最も基本的な構成で測定を行う。Tmファイバ長20 mを用い、2波長前方励起の増幅器を構成した。この構成で利得、雑音指数、飽和特性などの基本的な

振る舞いを明らかにしておく。さらに数値計算を行い、実験結果と比較することで、増幅現象の理解と考察を進める。ここで行った実験により、次節 4.5.3 節において、実用的な高利得・利得シフト TDFA の構成が発案される。

4.5.2.2 利得、雑音指数の波長依存性

図 4-7 に 16 波 WDM 信号 (-3 dBm 入力) を入力した状態での、小信号 (-20 dBm) の利得と雑音指数の波長依存性を示す。前方励起構成とし、Tm ファイバ長は 20 m とした。1.4 μm (1405 nm) 励起パワーは 110 mW 固定とした。1.56 μm 励起パワーの増大に伴い、利得が増大する。1.56 μm パワーが少ないとき (スペクトル a) 利得は最大 6 dB 程度と小さいが、利得ピークは 1460 nm 近傍にある。更に 1.56 μm パワーを増大させていくと利得は増大し、1.56 μm パワー 5.4 mW のとき最大利得 18 dB を得た (スペクトル b)。このとき利得ピーク波長は 1480 nm にシフトした。さらに 1.56 μm パワーを増大させると、利得ピークの長波側へのシフトと利得減少が生じた (c, d)。スペクトル c では、1470~1510 nm において 10 dB 以上の利得、1490 nm においては利得 15 dB が得られた。これは第 3 章の低雑音励起利得シフト TDFA と同様の過程である。当初 1.56 μm は利得増強に寄与するが、強すぎる場合は下準位数密度を増やし過ぎて、反転分布率が下がるためであると解釈できる。雑音指数は、利得 > 0 dB 以上の波長帯域において、6.5 dB 以下であった。

一方、計算結果 (実線、破線、一点鎖線) も同図に示す。第 2 章の数値モデルに従い、実験条件とほぼ同じ条件で計算した。計算結果と実験結果は、傾向および絶対値としても概ね整合していること分かる。平均反転分布率は、スペクトル a で 0.53、b で 0.51、c で 0.42 と低い値であった。

なお Tm ファイバ長 13.7 m でも同様の挙動を示す。ただし 1.4 μm (1405 nm) パワーを 70 mW で同じにした場合、1470 nm において小信号 20 dB を得るために必要な 1.56 μm パワーは 20 m ファイバでは 8.3 mW であるのに対し、13.7 m ファイバでは 33 mW とおよそ 4 倍必要であった。ファイバ長が短い分 1.56 μm 励起パワー (すなわち $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_4$ 遷移) を余分に必要とすると解釈できる。

スペクトル c の状態を維持し、利得等化器などの素子を段間に装着する 2 段構成により、雑音指数の上昇を抑えながら、利得平坦動作が可能であると考えられる。

20 m 長の Tm ファイバについて双方向励起構成の場合の利得・雑音指数を測定した (図 4-8)。前方励起 () に比べ、双方向励起において利得 () は向上し、雑音指数の劣化は無いことが分かった。ただし反転分布率が上昇するので、利得ピークは逆に短波側にシフトする。2 段構成などで高利得が要求される場合、双方向励起も使用可能である。

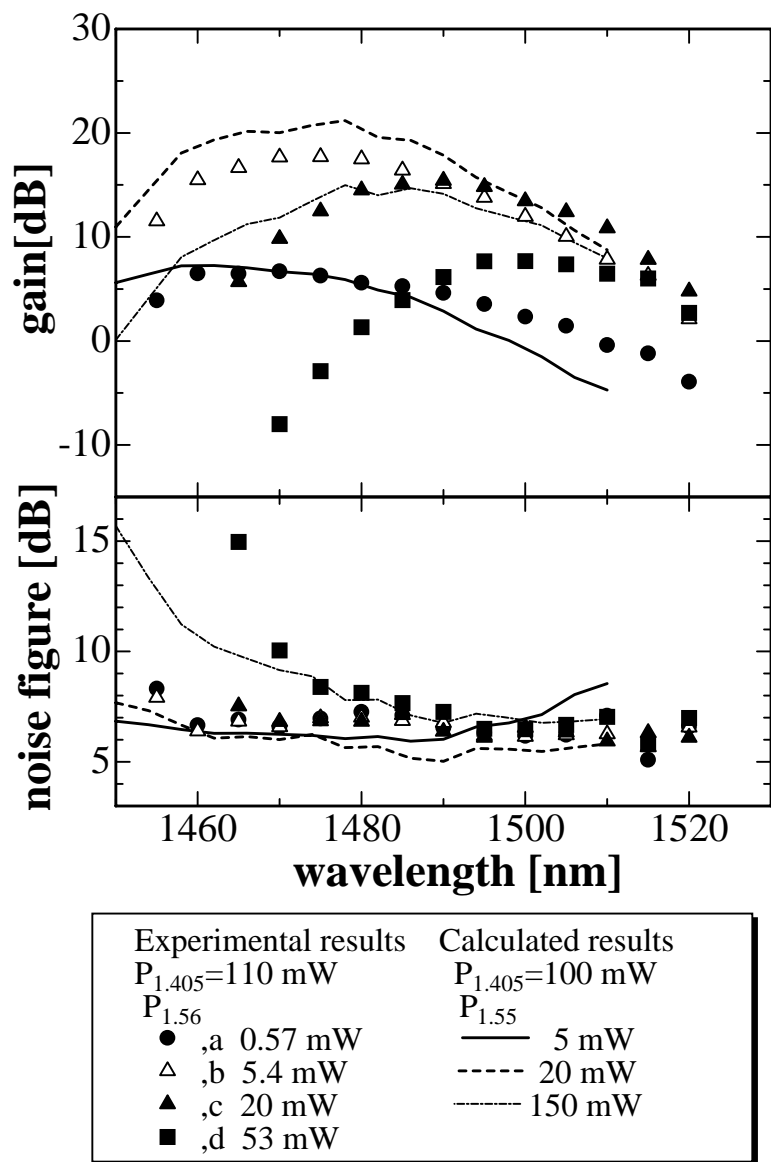


図 4-7 利得、雑音指数の波長依存性 (20 m 長の Tm ファイバを使用)

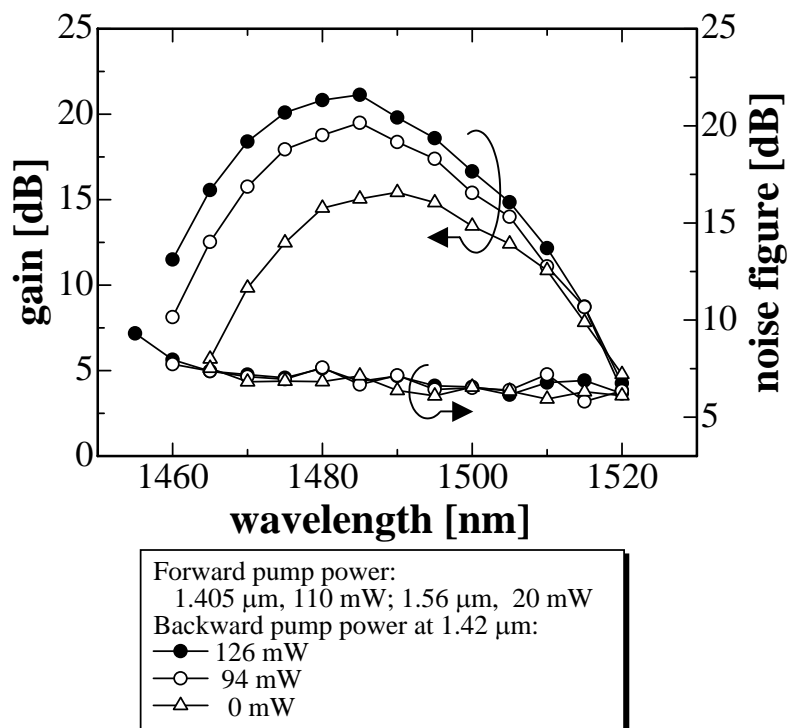


図 4-8 双方向励起の場合の利得、雑音指数の波長依存性 (20 m 長 Tm ファイバ)

4.5.2.3 利得、雑音指数の信号パワー依存性

図 4-9 に利得、雑音指数の増幅器出力 (入力) 依存性の実験結果 (左) 計算結果 (右) を示す。実験においては、前方励起構成とし、励起パワーは 100 mW (1405 nm) 17 mW (1560 nm) とした。飽和出力はおよそ +7 dBm、最大利得は 1480 nm において 30 dB 程度が実験より得られた。また利得飽和より手前で、雑音指数が徐々に劣化していく。小信号時 (-10 dBm 出力) よりも、飽和動作 (+5 dBm 出力) では 1~1.5 dB 程度増大する。完全に飽和したときには、雑音指数は 5 dB 程度悪化することも分かった。右図の計算結果では、利得は実験結果よりも 7 dB ほど大きく、利得 37 dB 程度、飽和出力は +12 dBm 程度と見積もられる。実験結果と計算結果は、全体的な傾向としては合致している。

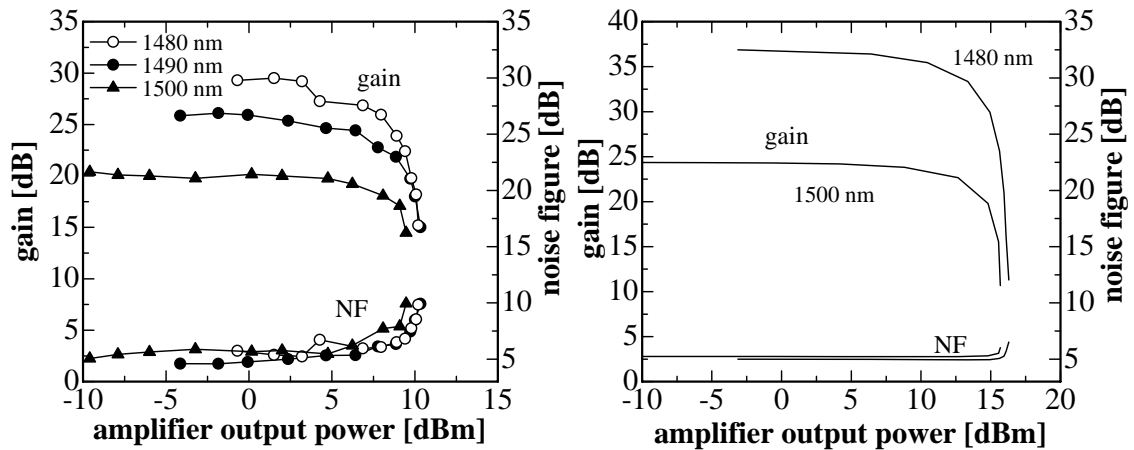


図 4-9 利得、雑音指数の増幅器出力依存性（左：実験結果、右：計算結果）

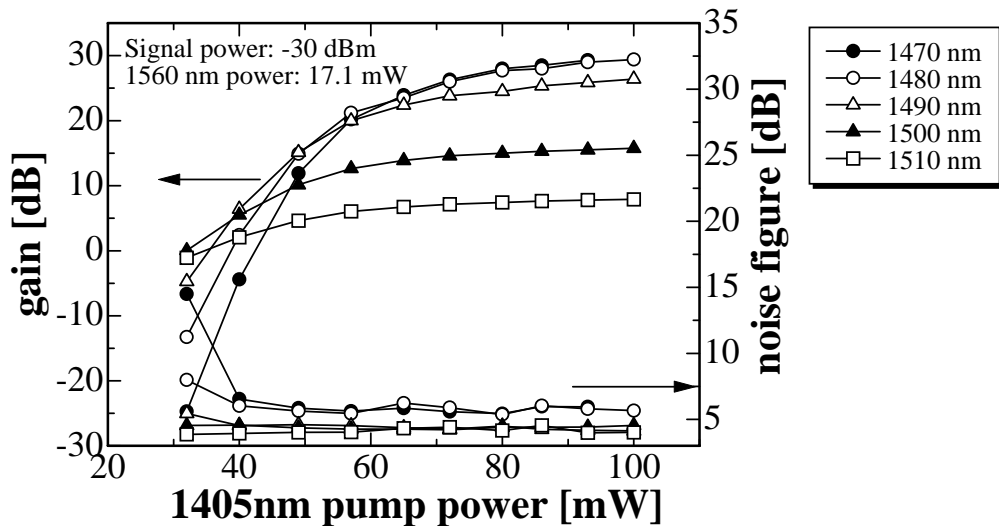


図 4-10 利得、雑音指数の励起パワー依存性（20 m ファイバ、実験結果）

4.5.2.4 利得、雑音指数の励起パワー依存性

利得・雑音指数の励起パワー依存性の実測結果を図 4-10 に示す。これから、波長 1470~1480 nm における励起効率、およそ 0.26 dB/mW であり、同程度の利得・飽和出力を有する L 帯 EDFA と遜色ないことが分かった[2]（ただし C 帯 EDFA はおよそ 10 倍高い）。また雑音指数は励起パワー 50 mW 以上では急激に減少している。第 3 章 3.4.2.4 節から 1.05 μm 励起 TDFA および低雑音励起 TDFA で得られている利得効率は、それぞれ 0.13 dB/mW、0.20 dB/mW であり、本方式の励起効率はこれらよりさらに 1.3 倍から 2 倍に改善されている。

この実験結果を解析的に考察する。本励起方式の TDFA を簡単のため 3 準位系と近似す

ると、小信号での励起効率 m [dB/mW] は次式で表される[3]。

$$m \text{ [dB/mW]} = C \cdot \frac{\sigma_{se} \tau_{31} [1 - \exp(-(a/w_s)^2)]}{\pi h \nu_P w_P^2 [1 - \exp(-(a/w_P)^2)]^2} \quad (4-3)$$

ただし、 C ：飽和の度合いを表す係数（ここでは簡単のため定数とした）、 w_s 、 w_P ：信号波長および励起波長での Tm ファイバのモードフィールド径、 a ：コア半径（0.95 μm ）である。励起波長が 1.05 μm 及び 1.4 μm の場合について、(4-3)式の比を計算すると $m_{1.4}/m_{1.05}=1.4$ となり、モードフィールド径が拡大した分を考慮しても、1.4 μm 励起の方が、励起効率が 1.4 倍だけ高くなると考えられ、実験結果と整合する。

信号波長 1470 nm(信号パワー-30 dBm)における計算結果を、実験結果と合わせて図 4-11 に示す。低励起パワー（～40 mW）の時には、計算値と実験値は比較的差が大きい（～10 dB）が、60 mW 以上の高励起パワーでは、比較的差が小さい（3 dB 以下）ことが見て取れる。また雑音指数の傾向も良く合致している。Tm イオンの利用効率は、1.4 μm パワー100 mW において0.64であり、第3章においてアップコンバージョン励起でTm イオン利用効率0.19、低雑音励起で0.5程度であるのに対し、格段に効率よく Tm イオンを利用できている。

4.5.3 単一信号増幅における利得シフト動作特性

4.5.3.1 最適構成の検討

以上の議論を受け、光前置増幅に適した単一信号に対する高利得の高効率励起利得シフト TDFA を構築する。図 4-12 に単一信号増幅における構成を示す。2 段構成にしているのは、第3章 3.4.3 節での議論と同様、いたずらに Tm ファイバ長を伸長しても、効果的な利得シフトは得られないからである。また小信号動作での予備実験では、1.56 μm 励起パワーを後方より入射する方が、高い利得が得られたので、後段において 1.56 μm 後方励起を採用している。各段のファイバ長は実験的に最適化した。その結果、前段ファイバが 20 m のとき、最も利得シフトの度合いが大きく、波長 1495 nm において利得 22 dB を達成した。一方、前段ファイバ 13.7 m のときに利得シフトの度合いは僅かに小さいが、1480 nm での利得は 30 dB 以上であることを実験的に確認した。そこで、本節ではピーク利得重視の設計とし、前段を 13.7 m、後段を 40 m とした。

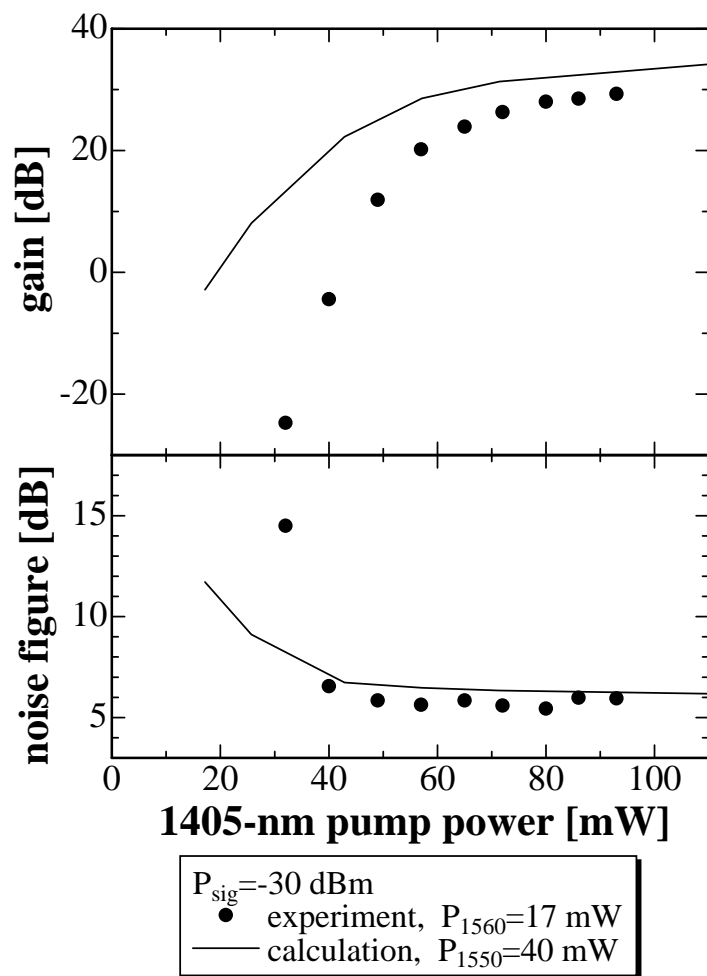


図 4-11 利得、雑音指数の励起パワー依存性の実験結果と計算結果の比較

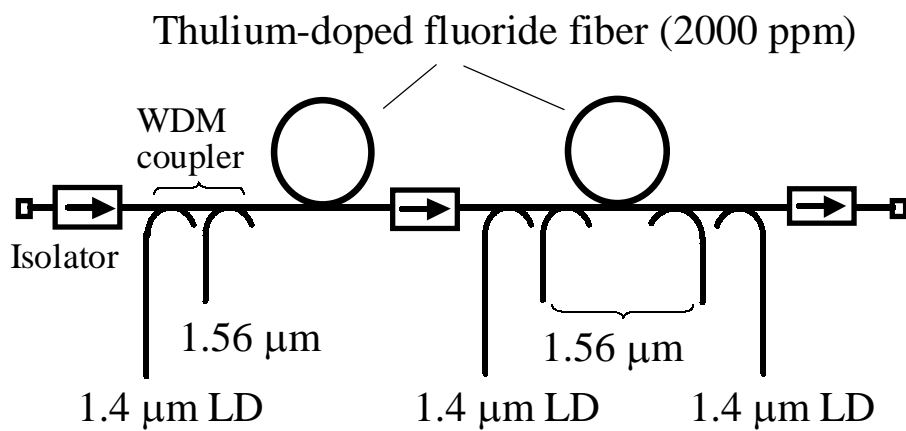


図 4-12 単一信号における利得シフト TDFA の構成

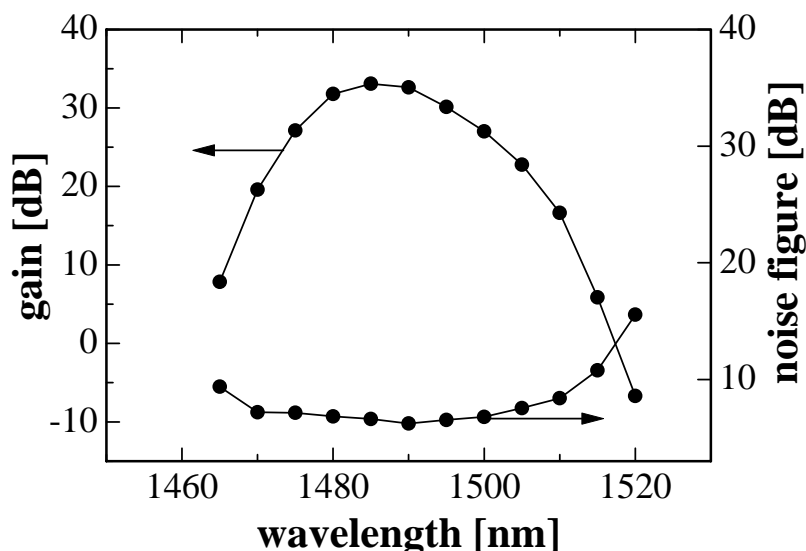


図 4-13 小信号増幅における利得および雑音指数スペクトル

4.5.3.2 低雑音、高利得の利得シフト増幅特性

図 4-13 に単一信号増幅における小信号利得 (入力信号パワー -30 dBm) と雑音指数の波長依存性を示す。利得シフト帯域 1475~1502 nm において利得 25 dB 以上、雑音指数 7 dB 以下を達成した。また波長多重信号増幅を模擬するため、飽和信号 (波長 1488 nm と 1500 nm、入力パワーはそれぞれ -8.25 dBm、-9.49 dBm、総合入力パワー -5.81 dBm) を小信号 (-30 dBm) と合わせて入射した結果、増幅器飽和出力として +17.1 dBm を得た。光/光変換効率は 10.1% に達した。この増幅器は小信号用に最適化されたものであるにも関わらず、すでに光/光変換効率において第 3 章の 3.4.4.3 節において得られた低雑音励起利得シフト TDFA の最大効率 9.1% を上回っている。次節以降で本励起方式の増幅器構成を波長多重信号用に最適化する。

4.5.4 波長多重信号増幅における利得シフト動作特性

4.5.4.1 最適構成の検討

中継増幅や一括増幅への応用を想定し、波長多重信号増幅に対して、最適構成を探索した。2 段構成を採用し、まず後段 Tm ファイバ長について 13.7、18.7、20、40 m を試し、20 m が利得・出力ともに最大になることを確認した。前段部分の Tm ファイバ長は、小信号の場合よりも利得が必要な分だけ長く、20 m 以上必要であった。そこで 2 段構成で前段部分と後段部分ファイバ長をともに 20 m とし、前段：前方励起、後段：双方向励起とした 2 段構成 TDFA を構築した。後段での後方励起光源は 1.4 μm 半導体レーザを偏波合成した。前

段の前方励起波長は 1405 nm とし、少しでも雑音指数を低減させるよう試みた。後段では 1420 nm を用い、信号波長と近接させることで高効率を狙った。以上の検討から図 4-14 に示す増幅器を構成した。

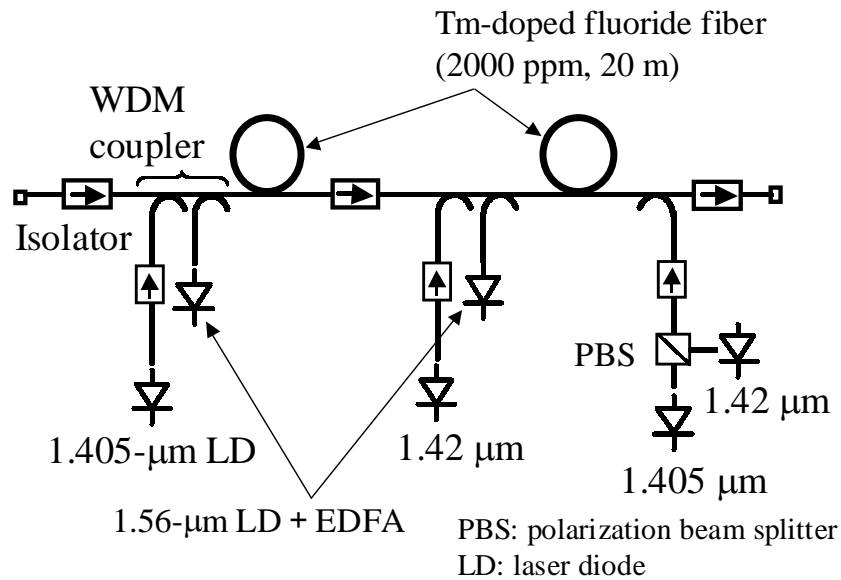


図 4-14 波長多重増幅用 高効率励起利得シフト TDFA の構成図

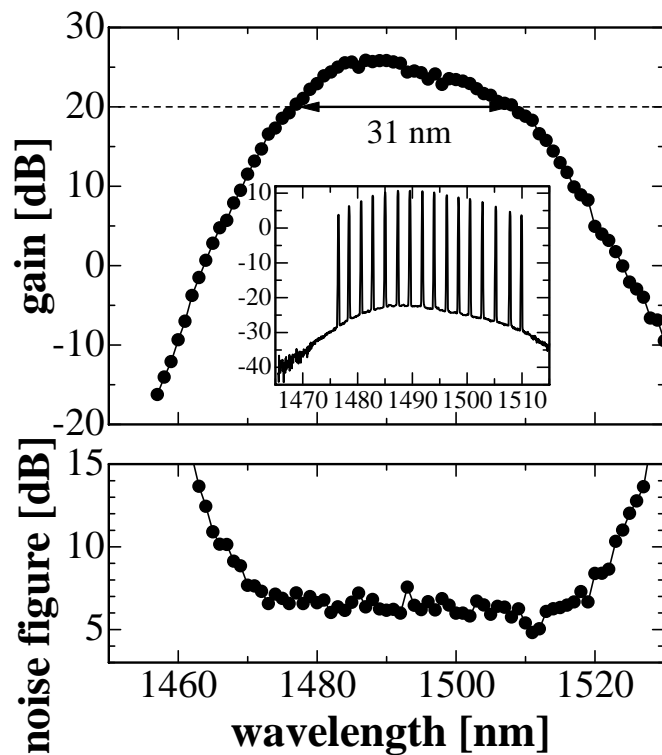


図 4-15 波長多重増幅での利得シフト TDFA の利得、雑音指数スペクトル
挿入図は、16 波 WDM 信号の出力スペクトル

4.5.4.2 利得、雑音指数の波長依存性

図 4-15 に波長多重増幅での利得・雑音指数を示す。飽和信号として-3 dBm を入力し、小信号-20 dBm を波長走引した。波長帯域 1477~1508 nm において利得 20 dB 以上、雑音指数 7 dB 以下、飽和出力+21.5 dBm を得ることができた。励起パワーは、前段前方 93 mW (1405 nm)、12 mW (1560 nm)、後段前方 107 mW (1420 nm)、1.1 mW (1560 nm)、後段後方 267 mW (1420+1405 nm) であり、総計 480 mW であった。挿入図に 16 波 WDM 信号増幅スペクトルを示す。

4.5.4.3 光/光変換効率の励起パワー依存性

図 4-16 に増幅器出力および光/光変換効率の全励起パワー依存性を示す。このとき、前段および後段前方励起パワーは 4.5.4.2 節での値に固定とし、後段の後方励起パワーのみを 0~270 mW まで可変とした。同図から、出力、光/光変換効率ともに励起パワーの増大に伴い上昇していくことが分かる。これは第 3 章 3.4.4.3 節に示した通り、低雑音励起 TDFA においても同様である。最大の光/光変換効率は 29.3% であった。低雑音励起利得シフト TDFA にて得られている光/光変換効率 (9.1%) の 3.2 倍と、大幅に改善された。本励起方式の着想の妥当性が示された。この効率は L バンド EDFA にも匹敵するものである。

さらに図 4-16 より、増幅器出力と効率は、後方励起パワーに対し未飽和なので、後方励起パワーをさらに増大することで両者はさらに向上するものと考えられる。ただし現状入手可能な 1.4 μm 帯 LD は最大パワーで 1 個当たり 200 mW 程度なので、偏波合成だけではなく、波長多重合成も行う必要がある。

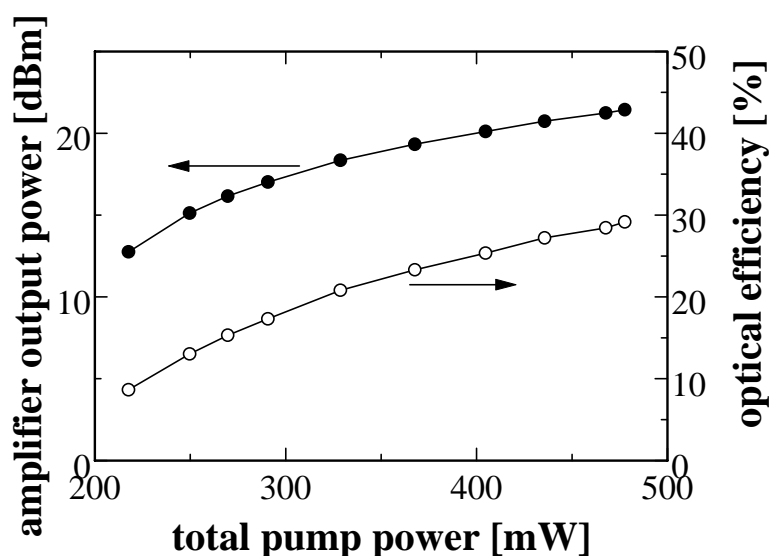


図 4-16 増幅器出力と光/光変換効率の励起パワー依存性

本励起方式は、 $1.05\text{ }\mu\text{m}$ 励起 TDFA や低雑音励起 ($1.05\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$) 利得シフト TDFA よりも、 Tm イオンをよりはるかに有効に利用できていると考えられる。光/光変換効率 29.3% という値は、未だ理論限界である量子効率 (93%) には到達していないものの、EDFA に匹敵する効率と考えられる。本研究では、これ以上の効率追求は行わなかったが、増幅器構成の検討、光部品の損失低減などを丹念に行うことで、さらに効率改善の余地はあると考えている。

4.5.4.4 2 段構成を用いた利得平坦特性

図 4-17 に利得等化器 (GEQ) を挿入した場合の構成を、図 4-18 に利得、雑音指数、利得等化器損失の波長依存性を示す。入力信号として 32 波の波長多重信号を用い、全入力信号パワーを -5 dBm (-20 dBm/ch) $\sim +5\text{ dBm}$ (-10 dBm/ch) について測定した。利得等化器の自由スペクトルレンジは第 3 章と多少異なり、 30 、 16 、 10 nm の 3 種類を用いた。

波長帯域 $1480\sim 1505\text{ nm}$ 、総入力信号パワー 0 dBm (チャネルパワー -15 dBm) で、 $\pm 1\text{ dB}$ 以下の利得平坦度を実現した。第 3 章でも述べたが、総入力信号パワーが変動しても、

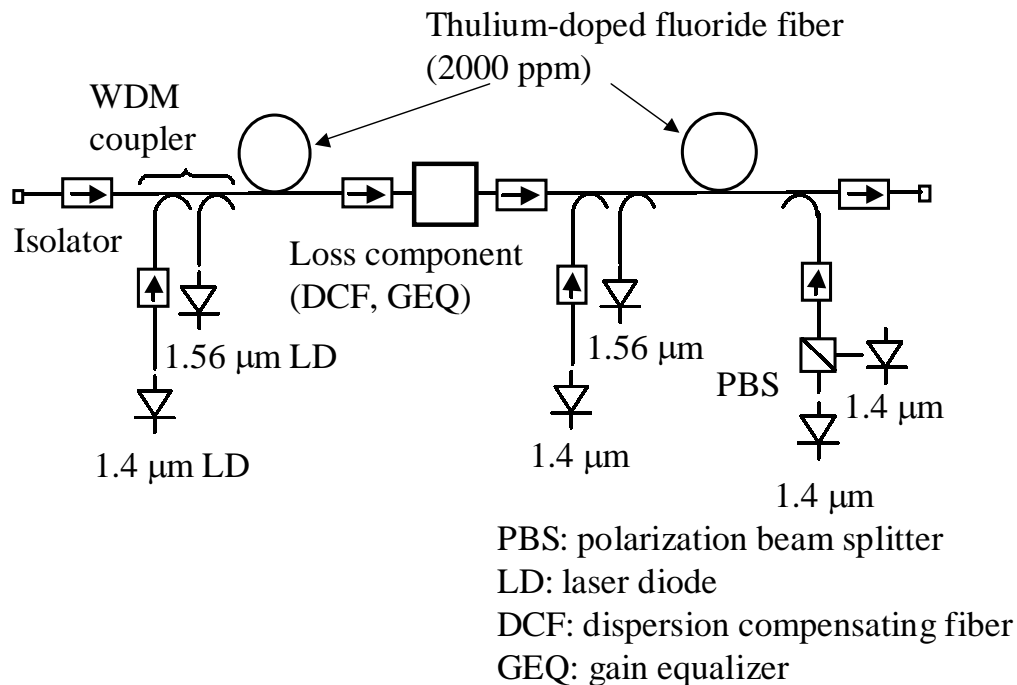


図 4-17 利得平坦動作利得シフト TDFA の構成

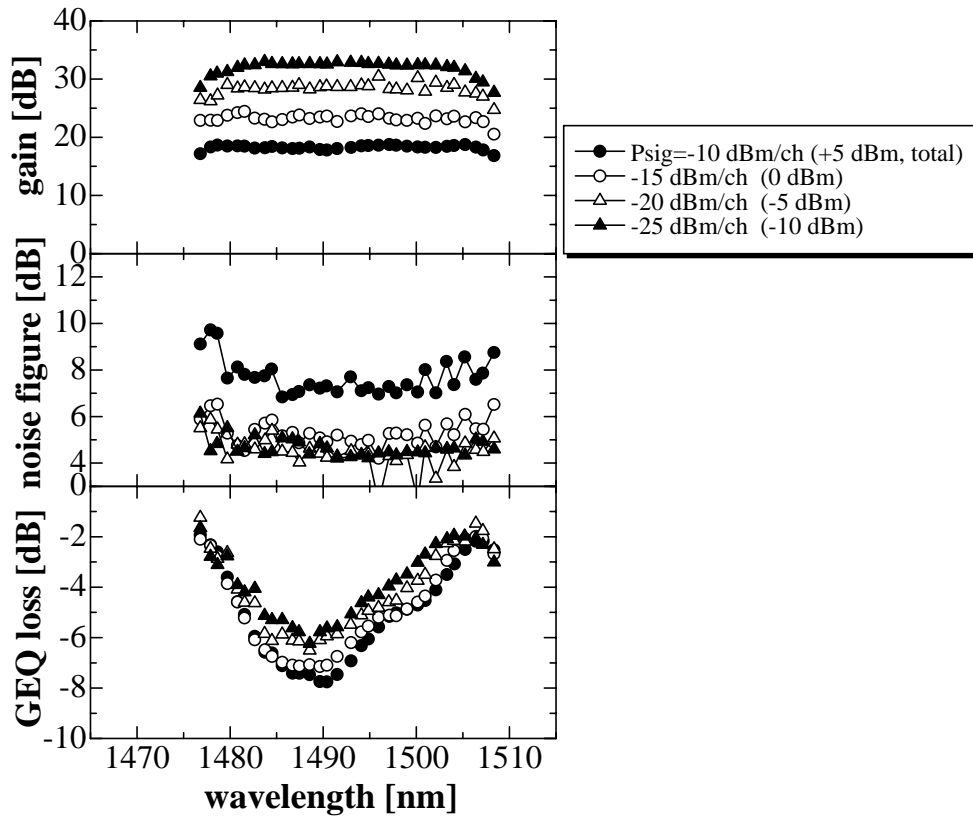


図 4-18 利得シフト TDFAs の利得平坦増幅特性

1.56 μm 励起パワーを信号パワーの増減と反対に調整し、下準位数を制御することで利得傾斜の生じない平坦な利得が常に得られる。このことも実際の伝送システムでは非常に望ましいことである。

図 4-18 から分かる通り、総信号パワーを -5 dBm から 0 dBm に上げる事で、およそ 5 dB の利得圧縮が生じているが、雑音指数の劣化はさほど大きく無く、1 dB 程度であった。この領域においては入力信号レベルを上昇させると、光 SN 比も上昇する。これ以上 (>0 dBm) 総入力信号パワーを上げると、利得飽和にともない、雑音指数が大きく劣化し、光 SN 比は向上しなくなることが観測されている。

なお第 5 章で述べる伝送実験において、伝送路ファイバの構成を 40 Gb/s 伝送に最適化し光 SN 比を最大に取った際、当初の想定 (総信号パワー 0 dBm 以下) よりも入力信号パワーレベルが上がり、+5 dBm の総入力信号パワーを利得シフト TDFAs に入射することになった。このとき上記のように雑音指数の劣化が顕著に表れ、光 SN 比改善が少なく、結果として伝送できなかった。これは図 4-17 の前段部分での利得が飽和し、後段の雑音指数が前段雑音指数に加算されるからである。そこで第 5 章においては図 4-17 の後段のみを使用する 1 段

構成へと切替え、高利得は得られないものの、雑音指数劣化を抑制した。

なお光伝送システムへの適用を考慮した場合、伝送路で生じる分散の補償をファイバ増幅器で行うことも視野に入れる必要がある[4, 5]。一般に、伝送路ファイバがシングルモードファイバの場合、平均分散は波長 1550 nm で ~ 17 ps/nm/km である。80 km 伝送スパンを考慮すると 1360 ps/nm もの蓄積分散が生じる。変調速度 10 Gb/s 以上の高速伝送では、

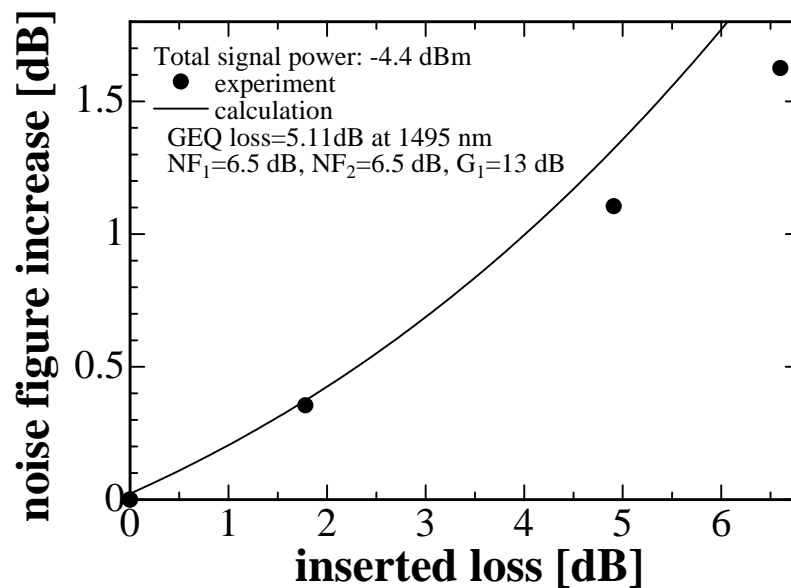


図 4-19 雑音指数上昇量の段間損失依存性

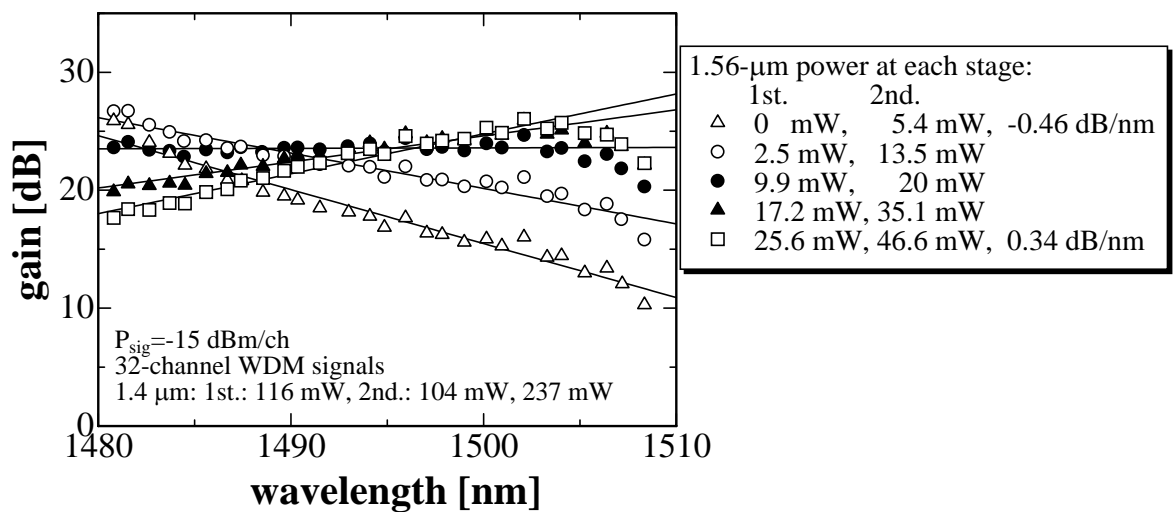


図 4-20 第 2 励起光による利得チルト制御特性

この分散を補償しないと、深刻な波形劣化により伝送信号の符号誤り率が著しく増大する。そこで中継増幅器や光前置増幅器では、スパン蓄積分散と等量で逆符号の負分散ファイバ（分散補償ファイバ、dispersion compensation fiber; DCF）を段間に装着することが一般的である。なお段間に挿入する理由は、増幅器全体の光/光変換効率や利得は低下させないで、DCF の持つ損失成分を補償できるためである。ただし DCF の損失により、雑音指数は多少とも上昇する〔第 2 章(2-13)式〕。そこでその上昇の度合いを把握する測定を行った。

図 4-19 に雑音指数上昇量の挿入損失依存性を示す。段間損失 5 dB 時には、およそ 1.1 dB ほど雑音指数が上昇することが分かった。一般的な DCF の性能指数は、およそ 120 ps/nm/dB であるので、この損失量はおおよそ 600 ps/nm 分、すなわち石英シングルモードファイバ 35 km の分散を補償する量である。この 1.1 dB という値は、前段利得と段間損失および雑音指数から計算される依存性（実線）とほぼ整合する。図 4-17 の構成においては、これ以上の損失成分の挿入は雑音指数の著しい劣化（>1.5 dB）を招くので望ましくないことも分かる。想定する光伝送システムにも依存するが、中継器としては 10 dB 程度の DCF 損失を想定する場合もある。利得シフト TDFA の実用化に向けて、利得と損失成分の増幅器内配置も含め、より低雑音指数の実現が今後の課題である。

また利得チルト特性を図 4-20 に示す。利得チルトはシステムにおいて重要な因子である。というのは、第 5 章でも述べるが、伝送路ファイバ損失の波長依存性と誘導ラマン散乱とにより、伝送路へ平坦なスペクトルで信号を送出したとしても、伝送後には信号パワーの波長方向の傾斜を来たすことが知られている。中継増幅時に、これを再度平坦に戻すことが必要である。EDFA では傾斜損失を有する受動光部品を用いて傾斜補償することが成されているが[6]、本研究での利得シフト TDFA は、1.56 μm 励起パワーの増減のみにより傾斜補償できる点で優位である。

図 4-20 ではもともと平坦であった利得スペクトル（図中の○）を、波長に対して正（図中の△、0.34 dB/nm）または負（図中の▽、-0.46 dB/nm）の傾斜を有するように制御できることを示している。すなわち伝送路ファイバ中で信号スペクトル傾斜が生じた場合に、意図的にその傾斜を補正することが可能であることを示している。

4.6 偏波モード分散（PMD）特性

一般に変調速度 10Gb/s 以上の高速伝送においては、偏波モード分散（Polarization mode dispersion; PMD）がシステムの高性能化を阻む制限要因として顕著に現れてくる。偏波モード分散とは、通常は縮退している直交する 2 偏波が、伝送路あるいは光部品中の複屈折な

どで分離し、それぞれが異なる伝搬遅延時間で受信器に到達することによるモード分散である[7]。これは直接的に受信波形の劣化（ジッタやアイ開口劣化）を引き起こす。許容される偏波モード分散量は 40 Gb/s システムにおいては 2.5 ps（ビットスロットの 1/10）程度とされている。高密度波長多重において偏波多重分離受信を行う場合はさらに厳しくなり、受信感度劣化 1 dB を許容する場合、システム全体で 1.5 ps となることが示されている[8]。

ここで、第 5 章で述べる光伝送システムとして、中継増幅器 1 台、2 スパン伝送を想定した場合、一括増幅器（1 台）、中継増幅器（1 台）、光前置増幅器（2 台）の合計 4 台の利得シフト TDFA を通過する。各々の増幅器において最低 20 m ないし 40 m の Tm ファイバを使用するので、最大 160 m の Tm ファイバを通過する。PMD は距離の平方根に比例するため、一つの Tm ファイバモジュール（20 m）あたりの最大許容値は、 $1.5 \text{ ps} / \sqrt{8} = 0.53 \text{ ps}/20 \text{ m}$ となる。さらに実際には、TDFA 内の他の光部品（波長多重カプラ、アイソレータなど）の PMD も加算する必要がある。本研究開始当初の Tm ファイバの PMD は平均 2.1 ps/20 m であり（ものによっては 10 ps を越えるものもあった）PMD 低減が高速伝送実現の一つの鍵であった。

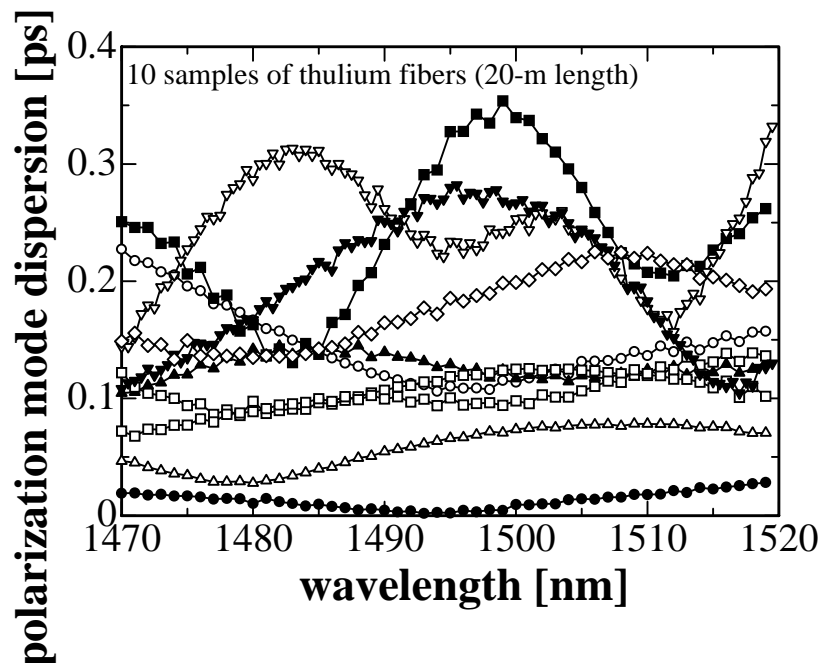


図 4-21 Tm ファイバの偏波モード分散の波長依存性（10 サンプル、20 m 長）

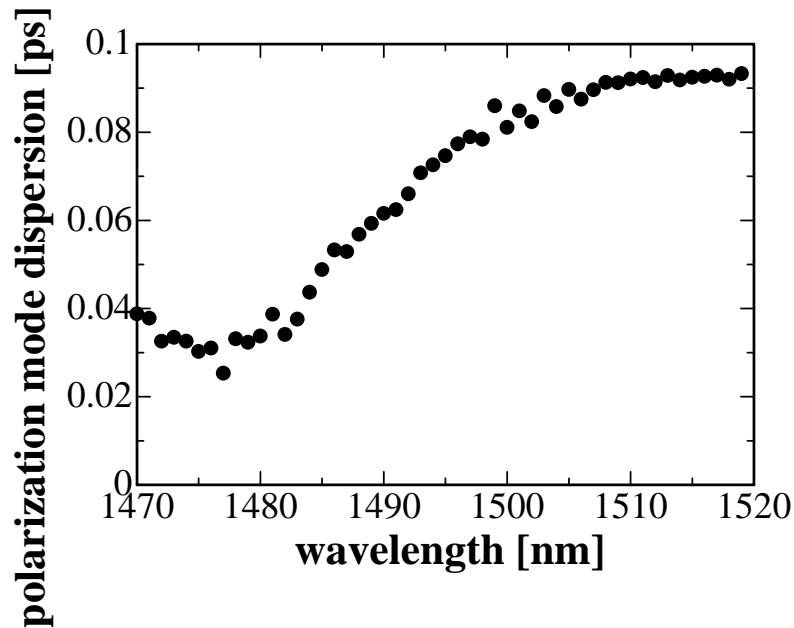


図 4-22 利得シフト TDFA 装置の偏波モード分散の波長依存性

このような指針を受け、メーカー（NTT エレクトロニクス）に、この仕様を達成する Tm ファイバの試作を依頼してきた。幾つかの試作を経て、改良された Tm モジュールにおいて 0.35 ps/20 m 以下を達成した。図 4-21 に Tm ファイバ（10 サンプル、20 m 長）の PMD 測定結果を示す。偏波アナライザ（アジレント製 HP8509）を用い、ジョーンズ・マトリクス法により PMD を測定した。最小 0.05 ps、最大 0.35 ps であった。この Tm ファイバにおいては、導波構造の設計の変更（比屈折率差 を従来の 3.7% から 2.5% への低減）がなされている。Tm 添加濃度や長さについては従来どおり 2000 ppm、20 m である。比屈折率差 の低減により、励起光のコアへの閉じ込め率が減少し、励起効率が低減することが懸念されたが、実験結果によると、ほとんど高 のものと差異が無い。これは波長多重増幅では非常に高いパワーレベルの信号が入力され、基本的に飽和増幅領域での動作であるため、 の違いが動作特性に余り効かないためと考えられる。

高効率励起利得シフト TDFA 装置（図 4-17）を構成した場合の PMD は、最良 Tm ファイバモジュールを組み合わせたとき、0.1 ps である（図 4-22）。Tm ファイバ以外の光部品については、アイソレータ（0.05 ps）、波長多重カップラ（0.05 ps）などである。増幅器の総合的な PMD として 0.1 ps 以下という値は、EDFA と比較しても遜色ない値であり、変調速度 40 Gb/s の光伝送実現に向けて大きく前進したと言える。

4.7 高効率励起方式におけるツリウム添加ファイバの信頼性

第3章3.5節にて、低雑音励起方式利得シフト TDFA において、ツリウムファイバに光による突発的損傷が生じていたことを述べた。しかしながら本章の高効率励起利得シフト TDFA においては、そのような損傷は皆無になった。第5章に述べる伝送実験に際しても半年以上無事故で実験を完遂できた。

これはファイバメカにおける作製技術の進展なども考えられるが、本方式を採用することで、励起光源を半導体レーザに置換することができ、励起レーザパワーの時間的変動を抑制できたこと、緑青色蛍光が抑制できたことが複合的に起因していると思われる。今後、損傷メカニズムの一層の解明が待たれる。

4.8 伝送実験用試作装置

試作した高効率励起利得シフト TDFA の装置写真（概観）を図4-23に示す。図4-17に示す6個の励起 LD（ $1.4\ \mu\text{m}$ ：4個、 $1.56\ \mu\text{m}$ ：2個）と2つの Tm ファイバモジュール（20 m を2個）および利得等化器を内蔵している。分散補償ファイバの接続は外部で行うように FC アダプタをフロントパネルに装着している。試作スピードなどの点から、新規設計ではなくメカ保有の既存筐体を用いた。このため装置サイズは若干大きめである（19 インチ幅）。しかし実装設計に注力すれば、EDFA 並に小型化できる。



図 4-23 試作した高効率励起利得シフト TDFA 装置

4.9 低雑音励起方式との比較および最適構成

第 3 章の実験結果および本章のこれまでの実験結果を鑑み、応用別に最も適した利得シフト TDFA 構成を簡単に考察する。

まず、きわめて低雑音な小信号増幅が必要な光前置増幅器の場合は、低雑音励起方式が優れていると言える。明らかに高効率励起方式は得策ではない。なぜなら、4.3 節でも示した通り、量子限界の雑音指数を得ることは本質的に出来ず、雑音指数 4~5 dB になるからである。低雑音励起では、量子限界に極めて近い雑音指数が得られるので、受信感度向上に直接的に効果がある。またこの場合、光/光変換効率はあまり問題ではない。というのは、光前置増幅器は受信端に配置され、システム全体に占める割合が少ないためである。

一方、送信側の一括増幅器では高出力が必要である。そこで高効率励起方式を採用し、2 段構成を取ると良い。光/光変換効率は最大となると予想される。この場合、雑音指数はそれほど低くは無いが、一括増幅器には光前置増幅器ほど低雑音が要求されないので、この構成が望ましい。

中継増幅器の場合、低雑音でかつ高出力が望まれる。従って 2 段構成を取り、前段は低雑音励起方式、後段は高効率励起方式を採用するのが最も優れた性能を発揮する。低雑音励起方式を採用した場合、励起レーザとして本研究で開発した半導体レーザ励起 Yb:YAG レーザ (3.7 節) などを利用することが出来る。

4.10 まとめ

本章では、最初に高効率励起方式 ($1.4\ \mu\text{m}/1.56\ \mu\text{m}$) の発案指針を説明した。次にこれを適用した利得シフト TDFA 動作の振る舞いを理論的および実験的に明らかにした。まず数値計算により、反転分布や利得、雑音指数の振る舞いを解析した結果、本励起方式では、低雑音励起方式よりもさらに 3 準位系に近い挙動を示すことが分かった。また雑音指数は、量子限界 3 dB に届かず、1480 nm では最良でも 1 dB 程度上昇 (雑音指数 4 dB)、1470 nm では 2 dB 程度上昇 (雑音指数 5 dB) することも、理論解析から明らかになった。

実験において、光前置増幅を意識した小信号増幅と、中継増幅を意識した波長多重信号増幅とに対し、ファイバ増幅器の最適構成を考察し、それぞれの増幅特性を明らかにした。また伝送実験用に励起光源の全てを半導体レーザで実現した高効率半導体レーザ励起利得シフト TDFA 装置を試作した。

主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm) の発案指針を述べた。1.4 μm が本質的に高効率を実現できる理由は、励起光子および信号光子のエネルギー差が小さいこと、緑青色蛍光が極めて少ないことの 2 点による。
- (2) 数値計算により、高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm) が極めて 3 準位的な振る舞いをすることが判明した。利得最大となる最適ファイバ長の存在、飽和出力の励起パワーにともなう増大などの際立った特徴を示す。これは、1.05 μm アップコンバージョン励起のみならず低雑音励起方式に比べても、本質的にレーザ下準位 $^3\text{H}_4$ により多くの Tm イオンが存在するからである。解析的な取り扱いと数値計算による取り扱いは互いに一致し、1470 nm では雑音指数 5 dB になることが判明した。
- (3) 20 m 長 Tm ファイバを用い、本励起方式の動作特性を、理論的、実験的に把握した。低雑音励起方式よりも少ないパワーで、より高い利得や飽和出力を得ることが出来ることを示した。特に励起効率は 0.26 dB/mW であり、低雑音励起の 30% 増、1.05 μm アップコンバージョン励起の 2 倍の効率を得た。これは L バンド EDFA に匹敵する。
- (4) 小信号増幅を行い、帯域 1475~1502 nm において利得 > 25 dB、雑音指数 < 7 dB を実現した。
- (5) 波長多重信号増幅を行い、1477~1508 nm (帯域幅 31 nm) において利得 20 dB 以上、雑音指数 7 dB 以下、飽和出力 +21.5 dBm を得ることができた。このときの光/光変換効率は 29.3% であった。この変換効率は第 3 章の低雑音励起方式の 3.2 倍で、大幅に改善された。L バンド EDFA なみでもある。
- (6) 本励起方式を用いた伝送実験用の利得シフト TDFA 装置を試作した。19 インチ幅であるが、高密度実装により体積比 1/10 以下にすることは容易である。
- (7) Tm ファイバの信頼性については、低雑音励起と異なり大幅に改善された。この理由は、半導体レーザ自身の安定性と緑青色蛍光の抑制によるものと推察される。
- (8) 本研究開始時には 2~10 ps あった Tm ファイバの偏波モード分散を、ファイバメーカとの協同試作の結果、本研究において 0.35 ps/20 m 以下に抑制することに成功した。最も小さい PMD の Tm ファイバを組み合わせた場合、利得シフト TDFA 全体で偏波モード分散 0.1 ps 以下を実現した。これは 40 Gb/s 伝送が可能になったことを示す重要な結果である。
- (9) 中継伝送を意識し、利得平坦動作を行った。波長帯域 1480~1505 nm、総入力信号パワー 0 dBm (チャネルパワー -15 dBm) で、 ± 1 dB 以下の利得平坦度を実現した。
- (10) 段間に分散補償ファイバを挿入する実用中継増幅器を意識し、段間損失依存性を測定した。その結果、およそ 600 ps/nm の分散補償量に相当する 5 dB の損失を、

雑音指数の劣化 1.1 dB で実現できた。この損失最大値は、初段利得で制限されており、より高利得の初段を構成することで、標準的な石英ファイバ 80 km 分の 1300 ps/nm クラス (10 dB 損失) の補償が可能であると考ええる。

参考文献

- [1] E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., p. 364, 1994.
- [2] H. Ono, M. Yamada, M. Shimizu, and Y. Ohishi, "Comparison of amplification characteristics of 1.58 and 1.55 μ m band EDFAs," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 15, pp. 1509-1510, 1998.
- [3] M. J. F. Digonnet, "Closed-form expressions for the gain in three- and four-level laser fibers," *J. Quantum Electron.*, vol. 26, no. 10, pp. 1788-1796, 1990.
- [4] 木下進、尾中寛、近間輝美、「波長多重用光ファイバアンプと超大容量光伝送への適用」、*レーザー研究*、第 25 巻第 2 号、pp. 126-130、1997 年。
- [5] 木下進、「光ファイバー増幅器の構成法と制御技術」、*応用物理*、第 68 巻第 1 号、pp. 52-53、1999 年。
- [6] 広瀬智財、中路晴雄、角井素貴、畑山均、小山健二、赤坂伸宏、西村正幸、「PLC 型可変損失スロープ補償器」、*信学技報*、PS-99-70, OPE99-118, LQE99-109 (2001-01)、pp. 43-48、1999 年。
- [7] 小関健、「光伝送回路」、*電子情報通信学会*、第 11 章、2000 年。
- [8] T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasawara, R. Ohhira, and T. Ono, "6.4 Tb/s (160 \times 40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency," *ECOC2000*, postdeadline paper PDP1.1, 2000.

第5章 超大容量波長多重伝送への応用

5.1 まえがき

本章では前章までに述べてきた利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器を大容量光伝送システムに適用する。はじめに変調速度 10 Gb/s において、従来の C バンド、L バンドに加え、本研究の波長帯域 1.49 μm 帯を用い、無中継伝送した結果を述べる。これにより世界で初めて 1.49 μm 帯を含む 3 波帯伝送を試み、利得シフト TDFA の適用可能性を検証するとともに、3 波帯伝送技術における課題を抽出した。その結果を受け、変調速度 40 Gb/s において、波長数 273 チャンネルを波長多重した超大容量 10.92 Tb/s 波長多重伝送を行った結果について説明する。この容量は、一本の光ファイバに伝送した世界最大容量（2002 年 4 月現在）であり、電話回線 1 億 6 千万回線（64 kb/s 換算）、動画像 167 万回線（MPEG2、6 Mb/s 換算）に相当する。

5.2 変調速度 10 Gb/s における 3 波帯無中継伝送実験

5.2.1 実験構成

図 5-1 に、構成した無中継伝送実験の構成を示す[1, 2]。利得シフト TDFA の帯域 1.49 μm 帯（1480~1510 nm）に加え、EDFA を用いた従来帯域 C バンド（1530~1560 nm）、L バンド（1570~1610 nm）を用いた。ただし図 1-2 の ITU-T の定義による帯域幅より若干狭いのは

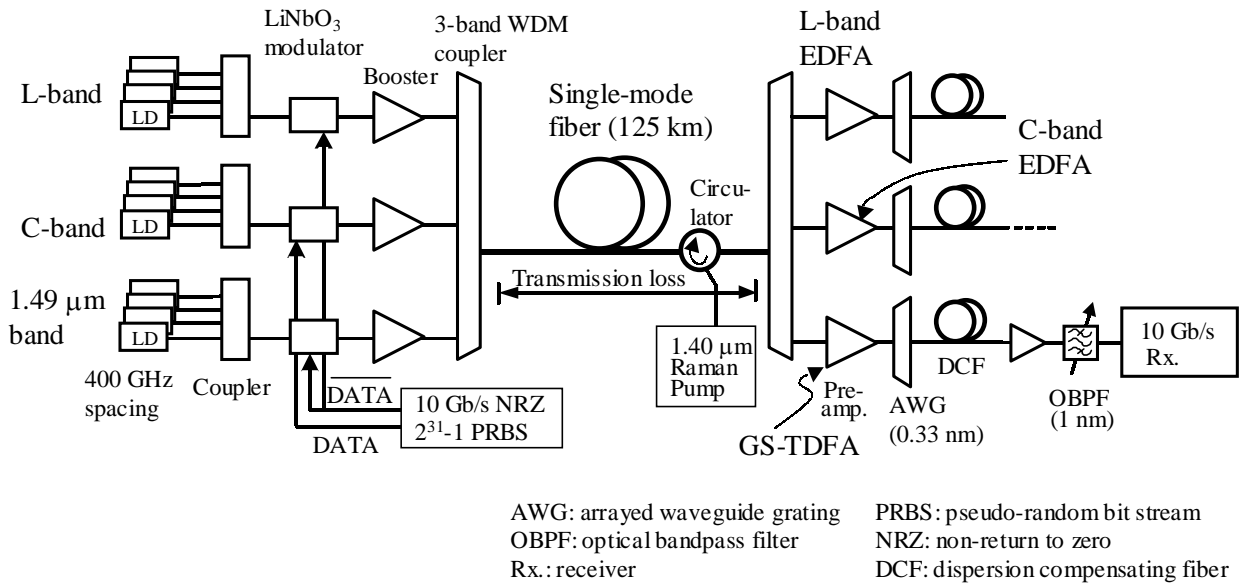


図 5-1 変調速度 10 Gb/s を用いた 3 波帯無中継波長多重伝送の実験構成

EDFA の帯域制限による。この場合、総帯域幅は 130 nm (この内、伝送に実際に使用しているのは 100 nm) にも達する。この超広帯域性により、伝送路光ファイバ中、特に前半部分での誘導ラマン散乱が発生し、信号パワーに波長方向の傾斜が生じる[3, 4]。というのは石英ファイバ中での誘導ラマン散乱は、励起光源となる基本波の波長からおよそ周波数 13 THz (1.55 μm 帯で 100 nm) だけ長波側にストークス散乱成分を発生するためである[5]。この現象をラマンチルトと言う。特に 1.49 μm 帯信号光パワーが 100 nm 長波の L バンドにエネルギー伝達し、1.49 μm 帯信号パワーが減少することが顕著に起こる。このことにより、1.49 μm 帯において伝送路ファイバの有する波長依存損失に加えて、過剰な損失成分を生み出し、1.49 μm 帯信号の光 SN 比が他の帯域に比べ低下し、全ての帯域にわたり均等な符号誤り率を有する伝送特性が実現できなくなると言う問題を引き起こす。

そこで本研究では、伝送路ファイバ後半部分で分布ラマン増幅 (distributed Raman amplification; DRA) を起こし、1.49 μm 帯に対して利得を発生させた。これにより上記のラマンチルトを補償することを試み、シングルモードファイバ伝送路 125 km を伝送することに成功した。ここで補足だが、ラマンチルトと分布ラマン増幅による信号増幅とは、本質的には石英ファイバにおける誘導ラマン散乱という共通の物理現象が根底にある。前者はそれを信号光間の望ましくないパワー移動と捉え、後者はそれを積極的に利用した増幅という切り口で捉えている。

DFB 半導体レーザを周波数 400 GHz 間隔で配置した。各バンド 12 波ずつ、合計 36 波の信号を波長多重した。この波長多重信号を変調速度 10 Gb/s で NRZ (Non return to zero) 一括変調した。擬似ランダム信号のパターン長は $2^{31}-1$ とした。分散補償は各バンドに分波後に行った。受信 Q 値測定は、識別点走引法で行った。ただし受信 Q 値とは、符号誤り率 BER と以下の関係にあり、符号誤り率とともに、伝送システム性能や伝送された信号の品質を表す指標としてよく用いられる[6]。

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (5-1)$$

$$Q[\text{dB}] = 20 \log_{10} Q \quad (5-2)$$

ただし通常 Q 値は(5-2)式のように対数値で表される。BER = 1.0×10^{-9} で $Q = 15.8$ dB、BER = 1.0×10^{-12} で、 $Q = 17$ dB である。

分布ラマン増幅のための励起光源は、ファイバ・グレーティングにより波長安定化されたファブリペロー型半導体レーザを用いた。波長 1393 nm と 1405 nm を用い、偏波合成を施した。伝送路ファイバへの入射パワーはそれぞれ 125 mW、190 mW (合計 315 mW)

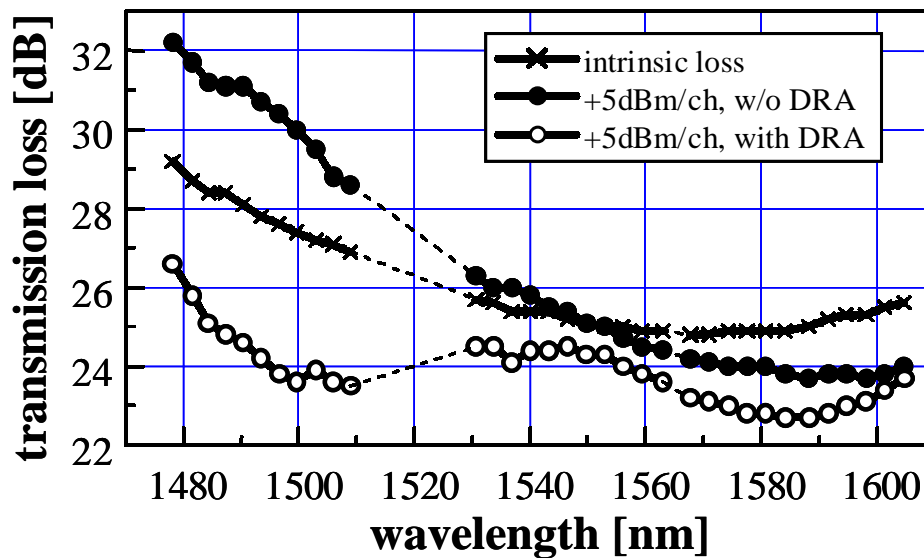


図 5-2 石英伝送路ファイバ (125 km 長) の損失の波長依存性

であった。受信側では、光前置増幅後、アレイ導波路回折格子 (arrayed waveguide grating; AWG、波長幅 0.33 nm) により波長分離した後、分散補償ファイバ (DCF) により分散補償し、帯域通過フィルタ (optical bandpass filter; OBPF) を通して受信器 (receiver; Rx.) に導入した。

送信側の一括増幅器、および受信側の光前置増幅器と、分波した後の単一チャネル増幅器として、3 台の利得シフト TDFA を用いた。本実験においては全て同じ構成のもので、第 3 章の低雑音励起方式を採用している。これは、時期的に低雑音励起利得シフト TDFA の開発と並行していたためであり、特に高効率利得シフト TDFA では不都合という訳ではない。

5.2.2 実験結果と考察

図 5-2 に用いたシングルモードファイバの伝送損失の波長依存性を示す。1.49 μm 帯と C、L バンドとの損失差は、TDFA の通常帯域 1.47 μm 帯を用いると 0.05 dB/km であったものが TDFA を利得シフトしたことにより、0.03 dB/km に縮小される。このため陸上用光伝送システムで一般的な 80 km スパンでは、2.4 dB 程度の少ない損失差になり、3 波帯同時伝送の実現可能性が極めて高いことが、第 1 章でも述べた本研究を行う動機の根本である。

一方、陸上系システムで典型的な送信パワーである +5 dBm/ch で、伝送路に信号を送出すると、上記の伝送路ファイバ中の誘導ラマン散乱により 1.49 μm 帯から L バンドへのエネルギー伝達が起こり、1.49 μm 帯はさらに 2.6 dB ほどの過剰損失を被った。このデータを

表す。この誘導ラマン散乱は、伝送路入力端から 25 km ほど伝搬した範囲内で生じている[1]。そこで、伝送路ファイバの後半部分で分布ラマン増幅 (DRA) を施した。その結果、1.49 μm 帯に対して 6 dB の利得が得られた ()。この分布ラマン増幅は、C バンドと L バンドに対してもそれぞれ 1.1 dB、0.9 dB と、僅かではあるが利得を与える。以上の予備実験から、伝送実験においては 1.49 μm 帯、C、L バンドの送出パワーにあらかじめ偏差を付けることとした。すなわちそれぞれ、+5、+4、+3 dBm/ch で送出した。

この場合、1.49 μm 帯の総出力は +16 dBm (+5 dBm/ch \times 12 波) に達する。このため、第 3 章で開発した +20 dBm 級の高出力の低雑音励起利得シフト TDFA を用いた。出力に 4 dBm の余裕があることで、増幅器の後にも様々な受動光部品を配置でき、伝送路の最適化実験には好都合であった。また受信器側では、伝送路損失 25 dB とすると、-20 dBm/ch が光前置増幅器に到達する。これを、受信器の熱雑音が無視できる 0 dBm/ch 以上にまで 20 dB 以上の高利得増幅を行う必要があり、第 3 章での小信号増幅特性が重要になってくる。

図 5-3 に伝送後の光スペクトルを示す。分布ラマン増幅がない場合、伝送路ファイバの損失以上に 1.49 μm 帯信号が減衰し、代わりに L バンド信号がエネルギーを受け取っていることが分かる (破線)。一方、分布ラマン増幅を施すことで、信号スペクトルは平坦にでき、傾斜補償が成されていることが分かる (実線)。なお 1.4 μm 近傍にあるのは、分布ラマン増幅用の励起光が、伝送路ファイバ中でレイリー散乱されて逆方向に戻ってきたものである。

図 5-4 に各チャネルの光前置増幅後の光 SN 比と受信 Q 値を示す。1.49 μm 帯の光 SN 比は、分布ラマン増幅無しでは、他のバンドに比べ約 4.5 dB 悪化しているが、分布ラマン増幅により、ほぼ他バンドと同程度の値 (およそ 28~30 dB) にまで回復した。この光 SN 比の改善を受け、受信 Q 値も全チャネルで 17 dB 以上 (符号誤り率 $< 10^{-12}$) を達成した。

以上の実験結果をまとめる。本実験において世界で初めて 1.49 μm 帯を含む 3 波帯伝送を実現するとともに、変調速度 10 Gb/s での伝送に利得シフト TDFA を適用することに対して、基本的な問題はないことが示された。また伝送システムの課題として、超広帯域伝送においては必然的に誘導ラマン散乱による 1.49 μm 帯過剰損失が伝送性能を制限していることを明らかにした。その対策として伝送路後半部分で分布ラマン増幅を施すことで、1.49 μm 帯の過剰損失を補償し、エラーフリー伝送を達成した。

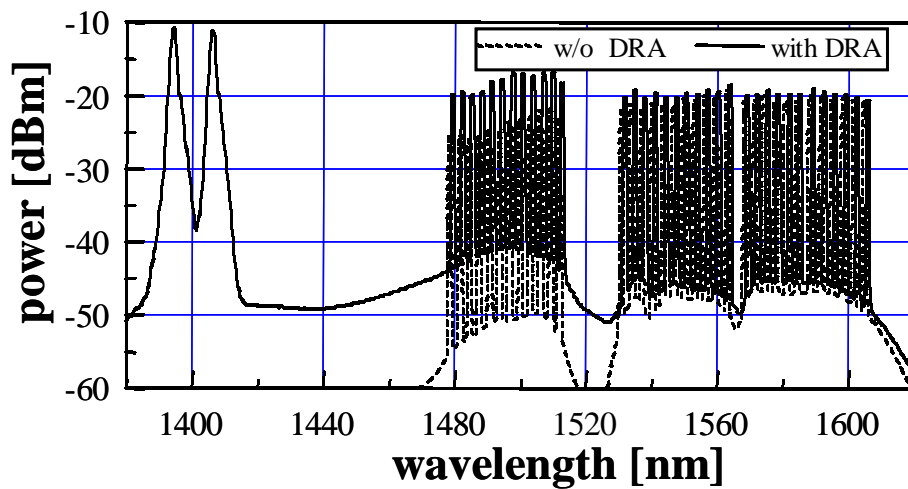


図 5-3 変調速度 10 Gb/s での伝送後の光スペクトル

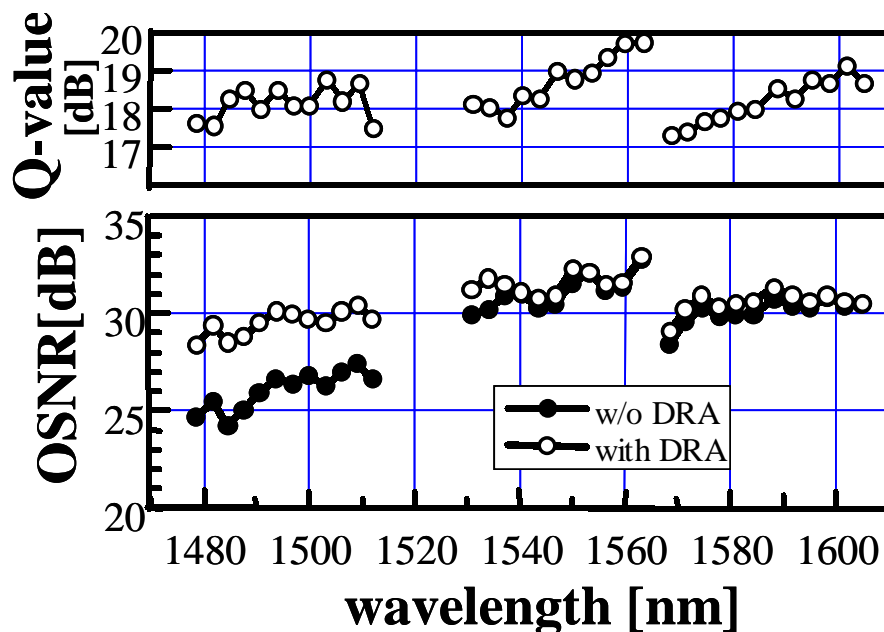


図 5-4 変調速度 10 Gb/s での光前置増幅後の光 SN 比と受信 Q 値

5.3 変調速度 40Gb/s における 3 波帯超大容量伝送実験

5.3.1 実験構成

5.2 節の伝送実験を受け、さらなる大容量光伝送の実現を目指した[7, 8]。伝送容量 10 Tb/s 級を目指すには、変調速度 40 Gb/s への高速化、周波数利用効率の向上 (0.8 b/s/Hz)、通信帯域 100 nm 以上、チャネル数 250 以上への高密度大容量化が必須である。また第 4 章に述べた利得シフト TDFA の偏波モード分散の低減、低雑音化など多数の技術課題を解決する必要がある。伝送路ファイバにおいては、5.2 節に述べた誘導ラマン散乱の影響に対し、分

布ラマン増幅を施すことが必須であった。また今回、純石英コアファイバ (pure silica core fiber; PSCF) と逆分散ファイバ (reverse dispersion fiber; RDF) とを組み合わせた分散マネージ型と呼ばれる伝送路を検討し、光 SN 比が最大となるように構成の最適化を行った[7]。なお、この純石英コアファイバは実効コア断面積が $110 \mu\text{m}^2$ と、石英ファイバ ($80 \mu\text{m}^2$) の 1.38 倍大きい。これにより誘導ラマン散乱の発生効率を低減する効果がある。

図 5-5 に超大容量伝送の実験構成を示す。2 スパン、1 中継の光中継伝送系を構築した。利得シフト TDFA は、送受信端以外に中継器としても使用している。中継器には第 4 章の高効率励起方式利得シフト TDFA 装置を用いた。単一チャネル受信端では第 3 章の低雑音励起方式を使用した。これは第 4 章の 4.9 節で述べた理由による。

$1.49 \mu\text{m}$ 帯 ($1476.81\sim1508.01 \text{ nm}$) に 85 波、C バンド ($1526.83\sim1563.05 \text{ nm}$) に 92 波、L バンド ($1570.01\sim1610.06 \text{ nm}$) に 96 波の総計 273 波を配置した。波長チャネル間隔は 50 GHz とした。各バンドにおいて、奇数および偶数チャネルそれぞれが偏波保持型 AWG (polarization-maintaining AWG; PM-AWG) により波長多重され、強度変調器 (LiNbO_3 ; LN) により変調速度 40 Gb/s で NRZ 変調された。擬似ランダム信号のパターン長は 2^9-1 とした。偶奇の両チャネル群は、偏光ビーム合成器 (polarization beam splitter; PBS) により多重された。これを偏波インターリーブ多重と言う。波長軸上で隣り合うチャネルの偏光が直交しており、高密度多重伝送における隣接チャネル間クロストーク抑圧および伝送路光ファイバ中での非線形効果抑圧に効果的であることが示されている[9]。

前節の議論を受け、 $1.49 \mu\text{m}$ 帯、C バンド、L バンドの送出信号パワーに予め偏差を付けた。それぞれチャネルあたりのパワーを -2 dBm/ch 、 -3 dBm/ch 、 -4 dBm/ch として送信した。

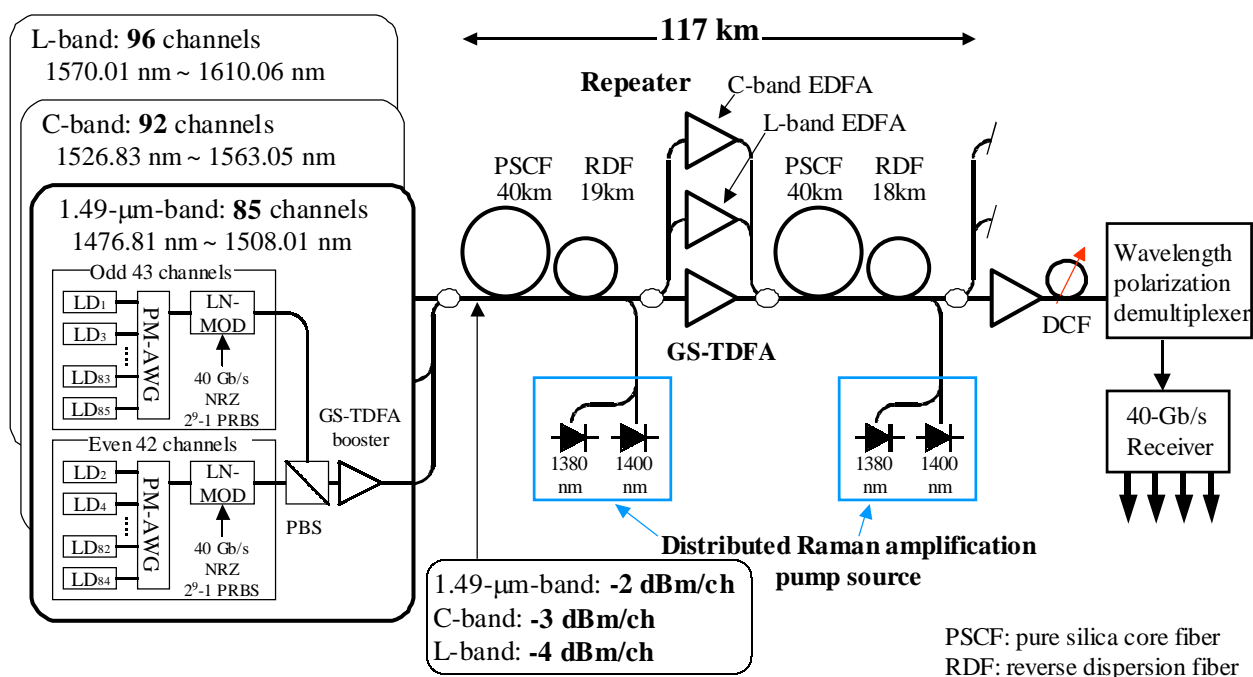


図 5-5 変調速度 40 Gb/s での総容量 10.92 Tb/s 光中継波長多重伝送実験の構成図

1.49 μm 帯の総送信パワーは、 $-2 \text{ dBm} \times 80 \text{ チャンネル} = +17 \text{ dBm}$ であった。少なくとも $+20 \text{ dBm}$ 級出力が利得シフト TDFA において要求されていることが分かる。第 4 章での開発により、高効率励起利得シフト TDFA においても、この出力は十分達成できている。

伝送路は、1 スパン中にファイバの分散の符号が切り替わる分散マネージ型伝送路を採用した。これは 40 Gb/s 伝送において、蓄積分散量を低減することが信号波形劣化の抑制に重要であるためである。伝送路構成について光 SN 比が最大となるよう最適化を施した結果、伝送路前半の純石英コアファイバの長さを 40 km、後半の逆分散ファイバの長さをおよそ 19 km とすると良いことが判明した。1.49 μm 帯の信号に対する分布ラマン増幅の励起光源は、波長 1380 nm (励起パワー 120 mW)、1400 nm (70 mW) とした。これにより平均ラマン利得 5.5 dB を得た。受信側では、偏光インターリーブ多重された信号を、波長および偏光について分離して電気受信器により受信した。

5.3.2 実験結果と考察

受信端での測定の結果、伝送路の光 SN 比を全チャンネルに渡り一定の 32 dB とすることができた。これは適切な送出パワー設定および分布ラマン増幅によるものである。図 5-6 に全チャンネルの符号誤り率を表す。全チャンネルで符号誤り率 1.0×10^{-9} 以下のエラーフリー伝送を達成し、総容量 10.92 Tb/s ($= 40 \text{ Gb/s} \times 273 \text{ 波}$) の伝送が達成された。また同図中には各バンドの代表チャンネルのアイパターンを示す。

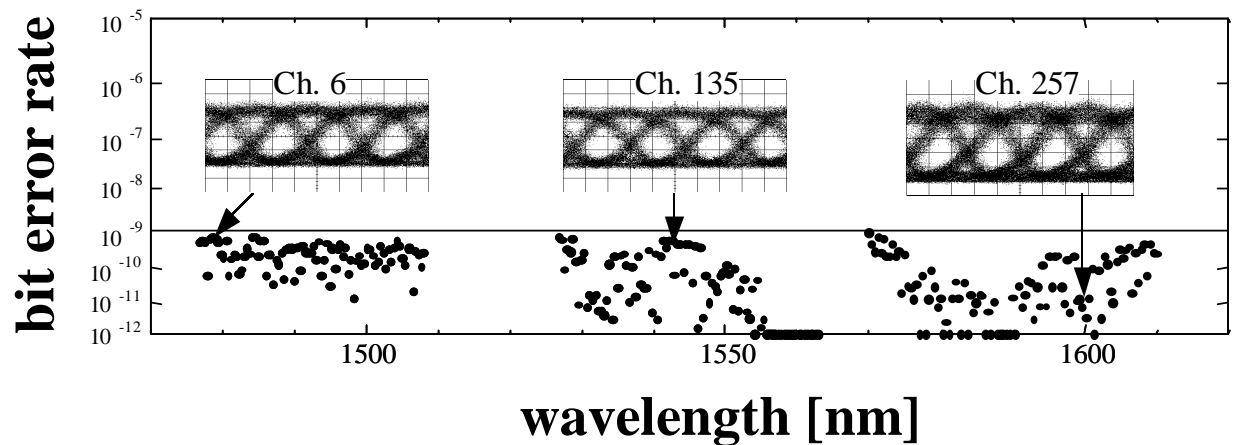


図 5-6 10.92 Tb/s 伝送における受信符号誤り率と各バンドのアイパターン

表 5-1 実用光伝送システムの仕様と本研究の利得シフト TDFA およびラマン増幅器の現状

項目	仕様 (EDFA を想定)	利得シフト TDFA	ラマン増幅器
変換効率	40~60%	~ (29.3%)	× (~20% [10])
出力	>23 dBm (80 チャネル想定)	~ (21.5 dBm)	~ (22 dBm [11])
利得	>25 dB (80 km スパン想定)	(20 ~ 25 dB)	(27 dB [12])
雑音指数	<7 dB (40 Gb/s 想定)	(7 dB)	(5 dB [11])
ファイバ信頼性	石英なみ	~× (フッ化物)	(石英ファイバ)
制御性	利得一定、利得平坦度		
非線形性	小(自己位相変調、相互位相変調、4 光波混合、2 重レイリー散乱)	(石英系と同程度の非線形屈折率 n_2 [15])	~× [13, 14]
サイズ	小型		(励起パワー大)

5.4 実用大容量伝送に適用する際のトリウム添加ファイバ増幅器への要求

以上までに述べた大容量波長多重伝送実験において、現状の利得シフト TDFA の性能は、少なくとも実験室レベルでの本質的な問題はなく、先端伝送システムへ適用可能であることが示された。利得シフト TDFA の増幅性能は、利得、雑音指数、利得平坦度、出力、光/光変換効率などあらゆる面で、限りなく EDFA に近づいてきていると言える。

一方、現実の光伝送システムに適用する際には、まだ幾つかの改善が必要である。例えば光/光変換効率の向上や雑音指数のさらなる低減など、光伝送システム設計、限界性能に強く関係する項目の改善は常に求められている。また第3章3.5節、第4章4.7節に述べたように、Tmファイバの材料面での信頼性はなお未解決である。表5-1に現状のEDFAを基準とした光伝送システムの仕様例を示す。仕様は、想定している伝送システムに強く依存するため一概には言えないが、大まかにこの程度が実用レベルで要求されている。この中で、出力や効率など、性能面でのさらなる向上は、本研究の成果をより一層推し進めることで、解決できると考えている。

なお第1章でも少し触れたが、別種の1.49 μm 帯増幅器としてラマン増幅器が上げられる。このラマン増幅器の現状も合わせて示した。光/光変換効率とサイズ、非線形性の点で、ラマン増幅器を増幅中継の主たる増幅器に採用することは難しいが、利得シフト TDFA と合わせて複合型光増幅器とすることは可能と考える。

またごく最近、ここ1年という範囲で、本研究以外にも他の研究機関により利得シフト TDFA の開発が精力的に行われるようになってきた。光ファイバ通信国際会議 (OFC2001、OFC2002) や光アンプ国際会議 (OAA2001) において新たな2波長励起方式[16-20]、ホスト材料探索(多成分石英系、テルライト系)[17, 21-23]、Tm高濃度添加法[24]などの報告がなされている。表5-2に本研究を含む現状での利得シフト TDFA の性能を示す。

光/光変換効率はシングルパス構成で29% (本研究)、50% [16]、高濃度添加法と反射型構成の組み合わせで42% [24]に達している。全て1.4 μm 励起を主励起として採用しており、本研究で初めて実証した事実、すなわち高効率動作のためには1.4 μm 励起が必須であることが、広く光ファイバ増幅器の研究者の間で認識されるに至った。

TDFA の単体の動作では、1.4 μm 高濃度添加法により70%を達成した報告もあり、TDFA の潜在能力を最大限に引き出す試みはなお継続している[25]。

また本論文に述べた以外の励起方式に関しても、様々な2波長励起法 (0.8/1.4 μm [16]、1.064 μm /1.117 μm [18]、0.98 μm /1.55 μm [20]、1.05 μm /0.8 μm [26]) が試行されている。なかでも0.8 μm /1.4 μm 励起や1.05 μm /0.8 μm 励起は、従来は自己終端型のため不利と考えられてきた0.8 μm 励起に1.4 μm や1.05 μm を加えることで、50%を超える高い光変換効率を実現したという点で興味深い。

また励起方式ではなく、Tm イオンのイオン間相互作用を利用する「高濃度添加法[24]」も非常に興味深い。高濃度添加法においては、Tm 添加濃度を通常の3倍程度 (6000 ppm) に上げることで、イオン間相互作用による交差緩和を引き起こし、下準位密度を増大させる。この手法によると第2励起光は不要という優位性がある。しかし現状、市販品として

入手可能な Tm ファイバの濃度は 1000~2000 ppm 程度であること、高濃度手法はイオン間相互作用（特にイオン間距離の 6 乗に反比例する交差緩和確率）[27]の高精度な制御が必要であること等の理由から、本研究では、材料面での完成度が高い低濃度ツリウム（2000 ppm）を用いて、利得シフト TDFA の限界性能追求を行ってきた。

今後の改善として、ホストがフッ化物ガラスゆえの材料不安定性や信頼性に関するものが挙げられる。材料メーカーの不断努力により近年著しく向上してきており、近い将来、石英に近い信頼性を達成する可能性があるが[28]、予断を許さない。また上に述べたようなフッ化物以外の新材料を用いた TDFA[17, 21-23]が実用レベルになる可能性もあると思われる。本稿に述べた励起スキームは、それら新材料探索においても極めて効果的であり、特にフッ化物よりもフォノンエネルギーの高いガラス媒質をホストとする場合（例えば石英[23]）2 波長励起を用いて初めて多音子緩和を上回り実効利得を取り出すことが可能である。

また光伝送システムにおいては、1.49 μm 帯の集中定数型ラマン増幅器や、伝送路での分布ラマン増幅との複合構成やラマン増幅を用いた中継伝送など[11, 12]、波長帯域拡大に対する精力的な研究開発が続けられている。近未来の実用波長多重システムにおいて、C、L バンドに加えて、利得シフト TDFA とラマン増幅とを併用した 1.49 μm 帯中継伝送装置が登場する可能性も高いと考えている。

表 5-2 利得シフト TDFA の原状

励起方式	励起波長 (nm)	濃度 (ppm)	ファイバ長 (m)	光 / 光変換効率 (%)	利得帯域 (nm)	最大利得 (dB)	雑音指数 (dB)	入力信号パワー (dBm)	出力パワー (dBm)	研究機関	参考文献
2 波長	1.05, 1.56	2000	60	2	1475-1510	30	5	-30	-	NEC	[29]
	1.05, 1.56	2000	60	9.1	1478-1505	25	7	+0.96	20.1	NEC	[30]
	1.05, 1.57	1000	10	10	1470-1520	11	7.5	-2	23	Fujikura	[23]
	1.4, 1.56	2000	53.7	10.3	1475-1502	32	7	-30	17.1	NEC	[31]
	1.4, 1.56	2000	40	29	1480-1510	25	7	-3	21.5	NEC	[32]
	1.4, 1.56	0.1mol%	9	1	1460-1520	32	-	-23	9	Corning	[17]
	1.064, 1.1	2000	12	5	1475-1485	20	10	+5	20	Alcatel	[18]
	1.4, 0.8	2000	12	50	1470-1500	15	-	+7	24.5	Alcatel	[16]
	0.98, 1.55	2000	10	-	1450-1500	17	-	-	3	Nortel	[20]
1 波長	1.4	6000	13	42	1480-1510	32	7	-7	23.9	NTT	[24]

5.5 まとめ

波長多重伝送における容量拡大を目指し、利得シフト TDFA の高速伝送への適用可能性を探った。変調速度 10 Gb/s における世界初の 1.49 μm 帯、C、L バンドの 3 波帯伝送に成功するとともに、そこで伝送技術における新たな課題を明らかにした。それは、伝送路における信号帯域間の誘導ラマン散乱がこのような超広帯域伝送における深刻な制限要因となることである。伝送路での分布ラマン増幅によりこの問題を解決した。

この実験を受け、一本のファイバにおいて未踏であった総容量 10 Tb/s 容量を目指し、変調速度 40 Gb/s、273 波の波長多重信号を 117 km にわたり中継伝送することに成功した。利得シフト TDFA の帯域に 85 波もの 40 Gb/s 信号を入力したが、前章までに開発した利得シフト TDFA は、40 Gb/s 信号に耐えうる高利得 (>20 dB)、低雑音 (<7 dB)、広帯域 (>30 nm)、低い偏波モード分散 (<0.1 ps) を有することで、世界で初めて最高速度での動作に成功した。伝送性能を深刻に制限する他の懸念要因、例えば非線形効果 (相互位相変調、自己位相変調、4 光波混合) など本実験では観測されなかった。この成功は、今後さらなる高性能伝送システムの構築に重要な飛躍を与えたと考える。

主要な結果を以下にまとめる。

- (1) 変調速度 10 Gb/s において、初めて 1.49 μm 帯と C、L バンドを含む 3 波帯伝送を行った。この結果、利得シフト TDFA は十分に高性能を発揮し、通常の C、L バンドと同等の増幅性能を実現し、伝送への適用に基本的な支障がないことが分かった。
- (2) 3 波帯伝送を世界に先駆け行うことで、信号帯域間の誘導ラマン散乱がこのような超広帯域伝送技術における課題であることを明らかにした。伝送路での分布ラマン増幅によりこの問題を解決した。
- (3) これらを受け、変調速度 40 Gb/s において、273 波を波長多重する総容量 10.92 Tb/s で 117 km にわたる中継伝送を行い、全チャネルにおいてエラーフリー伝送を達成した。偏波モード分散を 0.1 ps 以下に抑制していたこと、利得平坦動作を行ったことなど第 4 章までの開発により、変調速度 40 Gb/s という現状最速の伝送においても、利得シフト TDFA はや非線形効果やパターン効果、過剰雑音といった伝送阻害要因を発生することなく、正常に動作した。実用レベルの伝送装置への適用に際し、性能の面で本質的、基本的な課題は無くなったと考えられる。
- (4) 最後に、実用大容量伝送へ向けた要求や課題について触れた。また他研究機関による最近の利得シフト TDFA の開発動向について整理した。利得シフト TDFA はすで

に増幅性能の面で、EDFA に限りなく近づいたと言える。利得シフト TDFA の実用化への最後の障壁は、材料面での信頼性であることを指摘した。

参考文献

- [1] 矢野隆、笠松直史、横山吉隆、小野隆志、「3 バンド WDM 伝送における SRS ロスと補償方法の検討」、電子通信情報学会 2000 年通信ソサイエティ大会、講演予稿集 p. 390、論文 B-10-167、2000 年。
- [2] Y. Yano, T. Kasamatsu, Y. Yokoyama, and T. Ono, “Experimental study on SRS loss and its compensation in three-band WDM transmission,” ECOC2000, paper 7.2.6, pp. 39-40, 2000.
- [3] J. Kani, K. Hattori, M. Jinno, T. Kanamori, and K. Oguchi, “Triple-wavelength-band WDM transmission over cascaded dispersion-shifted fibers,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 11, pp. 1506-1508, 1999.
- [4] S. Bigo, S. Gauchard, A. Bertaina, and J.-P. Hamaide, “Experimental investigation of stimulated Raman scattering limitation on WDM transmission over various types of fiber infrastructures,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 6, pp. 671-673, 1999.
- [5] アグラワール、「非線形ファイバー光学」、吉岡書店、第 8 章、1997 年。
- [6] 小西良弘監修、山本果也著、「光ファイバ通信技術」、日刊工業新聞社、第 8 章、1995 年。
- [7] 福知清、笠松直史、森江正夫、大平理覚、伊東俊治、関谷かや人、小笠原大作、小野隆志、「3 バンドを用いた超高密度 WDM 10.92Tb/s 光中継伝送実験」、電子情報通信学会信学技報、OCS2001-47, PS2001-18, OFT2001-23 (2001-07)、pp. 13-18、2001 年。
- [8] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara, and T. Ono, “10.92 Tb/s (273 × 40 Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment,” OFC2001, postdeadline paper PD24, 2001.
- [9] T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasawara, R. Ohhira, and T. Ono, “6.4 Tb/s (160 × 40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency,” ECOC2000, postdeadline paper PDP1.1, 2000.
- [10] D. Harnoir, D. Bayart, J.-Y. Boniort, and C. Le Sergent, “Raman amplifier with a conversion efficiency in excess of 20%,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA'99), paper ThD23, 1999.
- [11] J. Bromage, J.-C. Bouteiller, H. J. Thiele, K. Brar, J. H. Park, C. Headley, L. E. Nelson, Y. Qian, J. DeMarco, S. Stulz, L. Leng, B. Zhu, and B. J. Eggleton, “S-band all-Raman amplifiers for 40 ×

- 10 Gb/s transmission over 6×100 km of non-zero dispersion fiber,” OFC2001, postdeadline paper PD4, 2001.
- [12] A. B. Puc, M. W. Chbat, J. D. Henrie, N. A. Weaver, H. Kim, A. Kaminski, A. Rahman, and H. FÈvrier, “Long-haul WDM NRZ transmission at 10.7 Gb/s in S-band using cascade of lumped Raman amplifiers,” OFC2001, postdeadline paper PD39, 2001.
- [13] P. B. Hansen, L. Eskildsen, A. J. Stenz, T. A. Strasser, J. Judkins, J. J. deMarco, R. Pedrazzani, and D. J. DiGiovanni, “Rayleigh scattering limitations in distributed Raman pre-amplifiers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 159-161, 1998.
- [14] アグラワール、*「非線形ファイバー光学」*、吉岡書店、第 4、7、8、10 章、1997 年。
- [15] D. M. Pataca, M. L. Rocha, K. Smith, T. J. Whitley, and R. Wyatt, “Actively modelocked Pr^{3+} -doped fluoride fibre laser,” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 12, pp. 964-965, 1994.
- [16] F. Roy A. L. Sauze, P. Baniel, and D. Bayart, “0.8- μm +1.4- μm pumping for gain-shifted TDFA with power conversion efficiency exceeding 50%,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA2001), paper PD4, 2001.
- [17] B. N. Samson, N. J. Traynor, D. T. Walton, A. J. G. Ellison, J. D. Minelly, J. P. Trentelman, and J. E. Dickinson, “Thulium-doped silicate fiber amplifier at 1460-1520 nm,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA2000), postdeadline paper PD6, 2000.
- [18] F. Roy, D. Bayart, and P. Baniel, “Novel pumping schemes for thulium doped fiber amplifier,” OFC2000, paper WA6, 2000.
- [19] F. Roy, P. Baniel, C. Fages, J. J. Girard, A. L. Sauze, and D. Bayart, “Optimal pumping schemes for gain-band management of thulium-doped fiber amplifiers,” OFC2001, paper TuQ7, 2001.
- [20] E. Zhang, S. Wilson, D. Crippa, R. D. Muro, and A. Maroney, “Tm-doped fiber amplifiers in the 1480 nm region with 980 nm/1550 nm pumps,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA2001), paper OWB2, 2001.
- [21] B. Cole and M. L. Dennis, “S-band amplification in a thulium doped silicate fiber,” OFC2001, paper TuQ3, 2001.
- [22] S. Shen, M. Naftaly, A. Jha, and S. J. Wilson, “Thulium-doped tellurite glasses for S-band amplification,” OFC2001, paper TuQ6, 2001.
- [23] 瀬木武、酒井哲弥、和田朗、*「石英系トリウム添加光ファイバーの増幅特性」*、電子情報通信学会総合大会、論文 C-3-143、2001 年。
- [24] S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi, and M. Shimizu,

- “1480-1510 nm-band Tm doped fiber amplifier (TDFA) with a high power conversion efficiency of 42%,” OFC2001, postdeadline paper PD1, 2001.
- [25]S. Aozasa, H. Masuda, T. Sakamoto, K. Shikano, and M. Shimizu, “Gain-shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70%,” *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 8, pp. 361-363, 2002.
- [26]A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, and W. Margulis, “Novel dual wavelength (1050nm + 800nm) pumping scheme for thulium doped fiber amplifiers,” OFC2002, postdeadline paper FB2, 2002.
- [27]櫛田孝司、「光物性物理学」、朝倉書店、第6章、1994年.
- [28]Y. Nishida, K. Fujiura, K. Hoshino, M. Shimizu, M. Yamada, K. Nakagawa, and Y. Ohishi: “Reliability of fluoride fiber module for optical amplifier use”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 1596-1598, 1999.
- [29]T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, “1.50- μ m-band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μ m dual-wavelength pumping,” *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 23, pp. 1684-1686, 1999.
- [30]T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51- μ m wavelength region,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 31-33, 2001.
- [31]T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-diode pumping (1.4 and 1.56 μ m) of gain-shifted thulium-doped fibre amplifier,” *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 19, pp. 1607-1609, 2000.
- [32]T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 5, pp. 433-435, 2001.

第 6 章 結論

本研究で得られた成果と本論文の結論を述べる。本研究では、近年のインターネットの爆発的普及にともなう通信需要の増加を鑑み、近未来の光伝送システムにおける容量拡大のために、未開拓帯域であった波長 $1.49\ \mu\text{m}$ 帯に着目し、その帯域での実用的な光ファイバ増幅器を開発することを第 1 の目的とした。これは波長 $1.47\ \mu\text{m}$ 帯で動作するツリウム添加ファイバ増幅器 (TDFA) の利得帯域を $1.49\ \mu\text{m}$ 帯へ長波シフト (利得シフト) することにより達成された。本研究では、この利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器 (利得シフト TDFA) を実現する新たな励起方式を 2 種類発案し (第 2 章) その理論的解析、実験による実証を行い、極めて厳しい仕様を要求される変調速度 $40\ \text{Gb/s}$ 光伝送においても使用に耐えうる特性のものを開発した (第 3 章、第 4 章)。

第 2 の目的は、開発した利得シフト TDFA を用いて、本研究開始前には未踏であった $10\ \text{Tb/s}$ 級の超大容量伝送を実現することを通して、利得シフト TDFA が真に高速伝送システムに適用可能か否かを判定すること、また未踏の超広帯域大容量伝送であるため、机上検討では分からない伝送技術における問題を実験的に抽出することにある。果たして $10\ \text{Tb/s}$ もの信号を正常に伝送できるか否かは、実証試験のみが示せる課題であった。実験室において、変調速度 $10\ \text{Gb/s}$ における $1.49\ \mu\text{m}$ 帯、C、L バンドを含む初の 3 波帯波長多重伝送実験を行い、3 波帯伝送特有の課題として信号帯域間の誘導ラマン散乱が顕在化すること、ならびに $10\ \text{Gb/s}$ 伝送への利得シフト TDFA の適用に基本的問題が無いことを示した。この先駆的実験を受け、変調速度 $40\ \text{Gb/s}$ 、波長多重数 273 波、伝送距離 $117\ \text{km}$ の光波長多重中継伝送を行った。これにより、世界に先駆け、利得シフト TDFA の先端光伝送システムへの適用可能性ならびに世界最大容量である $10.92\ \text{Tb/s}$ を実証した (第 5 章)。

本研究で得られた成果から、利得シフト TDFA は高密度大容量伝送に供する性能を十分に有しており、将来の帯域拡大の際に即応可能で、非常に有用な要素技術であることが示された。

本研究は、通信分野において新たな光ファイバ増幅器を提供するという産業的な価値もさることながら、より深い意味で学術的に貢献していると考えられる。第 2 章で述べたように、一般に希土類添加デバイスの発光スペクトルは、希土類イオンとホストの材料組成で決定されており、制御することは難しいとされてきた。本研究開始時の唯一の成功例は、基底準位と励起準位との間での発光を利用する EDFA における L バンド動作であった。本研究においては、2 つの励起準位間の誘導遷移を利用するため本質的に EDFA とは動作が異なる

ツリウム添加ファイバ増幅器という未開拓デバイスに対し、2 波長励起という手法で、利得スペクトルを制御することが可能であることを初めて示した。しかもその手法は基礎物理的な考察に立脚しており、ツリウムやエルビウムに限らず、広く希土類添加デバイス全般に適用可能な汎用性の高い概念を内包している。このことの学術的意味は計り知れない。希土類添加デバイスにおける新たな動作モードの探索、未開拓のエネルギー準位対を利用した新遷移の発見や有効活用などにおいても、本研究で開発してきた 2 波長励起手法は、非常に強力な探索手段と言える。

以下に、章ごとに得られた主要成果をまとめる。

【第2章】

本章では、最初に固体中の希土類イオンのエネルギー準位構造および発光・吸収スペクトルの特徴を説明し、EDFA での利得シフト原理について考察した。その結果、利得シフトには本質的に低反転分布が必要であること、これは他の希土類イオンでも可能であることが分かった。考察の結果、反転分布率を 0.4 (40%) 程度にまで低減することが出来れば、原理的には利得ピーク波長が 1.46 μm から 1.49 μm へと長波シフトし得るという指針を初めて示した。そこで TDFA での利得シフト動作を検討した結果、従来型 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA では下準位数が極めて零に近く、利得シフトが極めて困難であることが明らかになった。そこで、利得シフトを実現する新たな励起方式を 2 種類考案した。すなわち「低雑音励起方式 (1.05 μm /1.56 μm)」および「高効率励起方式 (1.4 μm /1.56 μm)」である。0.98 μm 励起 EDFA との類似性から、前者は低雑音励起が期待できる。一方、後者は、励起光子エネルギーと信号光子エネルギーの不整合が小さいため、高い光/光変換効率が期待できる。発案した励起方式を数値的に記述するため、励起光、信号光、信号帯域 ASE 光、および物理的な考察から必要と考えられる自然放出遷移 (800 nm 帯、1800 nm 帯) を含めたレート方程式モデルを構築した。

【第3章】

本章において、TDFA に対し低雑音励起方式を適用した結果を詳しく述べた。まず反転分布、利得、雑音指数の理論計算を行い、従来型の 1.05 μm アップコンバージョン励起 TDFA と低雑音励起利得シフト TDFA の動作の違いを明確化した。前者は下準位数がほとんど零の 4 準位系に近く、後者は比較的 3 準位系に近い振る舞いをすることが分かった。次に、光前置増幅を意識した小信号動作、一括増幅、中継増幅を意識した波長多重信号増幅動作

の特性を明らかにした。この実験において、高利得 (>25 dB)、低雑音 (<5 dB) の利得シフト TDFA を得ることに成功した。特に光伝送システムへの応用の際に重要となる利得平坦動作も行った。しかしながら、光/光変換効率は 9.1% と極めて低い値が得られた。なお理論解析は概ね実験結果をよく説明した。一方、変調速度 10 Gb/s での光前置増幅動作を行い、利得シフト TDFA において過剰雑音は発生していないことを確認し、高速光伝送への適用への第 1 関門を突破した。また、TDFA、Pr 添加ファイバ増幅器や Er, Yb 共添加ファイバ増幅器などの励起用の波長 $1.05\text{ }\mu\text{m}$ 帯高出力光源として、新たに半導体レーザ励起 Yb:YAG レーザを開発し、利得シフト TDFA と Er, Yb 共添加ファイバ増幅器へ適用することで、その実用性を実証した。Yb:YAG レーザのマイクロチップ化 (厚み $400\text{ }\mu\text{m}$) により、ほぼ半導体レーザと同様の小型サイズながら、 $1.05\text{ }\mu\text{m}$ 帯のワット級高出力光源を提供できる可能性が高いことを示した。

【第 4 章】

本章では、利得シフト TDFA のもう一つの実現手段である高効率励起方式 ($1.4\text{ }\mu\text{m}/1.56\text{ }\mu\text{m}$) の発案指針を説明した。高効率化のためには、励起光子と信号光子エネルギーを近接させ、かつ緑青色蛍光を抑制することが必要であった。次に、本励起方式における利得シフト TDFA の振る舞いを理論的、実験的に明らかにした。まず数値計算により、反転分布、利得と雑音指数の挙動を解析した結果、本励起方式では、低雑音励起方式よりもさらに 3 準位系に近い挙動を示すことが分かった。また雑音指数は量子限界 3 dB に届かず、 1480 nm では最良でも 1 dB 程度上昇、 1470 nm では 2 dB 程度上昇 (雑音指数 5 dB) することも、理論解析から明らかになった。光前置増幅を意識した小信号増幅や中継増幅を意識した波長多重信号増幅に対し、ファイバ増幅器の最適構成を考察し、実験的に特性評価を行った。その結果、波長多重増幅においては、利得 20 dB 以上、雑音指数 7 dB 以下、増幅器出力 $+21.5\text{ dBm}$ 、そして光/光変換効率 29.3% を達成した。この光/光変換効率は、利得シフト TDFA で初めて 30% に迫る変換効率を実現したもので、L バンド EDFA の変換効率に匹敵する。このことは、高効率励起方式の着想の妥当性を強く示している。理論解析は概ね実験結果をよく説明した。また、伝送実験用に励起光源の全てを半導体レーザで実現した高効率半導体レーザ励起利得シフト TDFA 装置を試作した。

【第 5 章】

波長多重伝送における容量拡大を目指し、利得シフト TDFA の高速伝送への適用可能性を探った。変調速度 10 Gb/s における世界初の $1.49\text{ }\mu\text{m}$ 帯、C、L バンドの 3 波帯伝送に成

功するとともに、伝送技術における課題を明らかにした。すなわち伝送路における誘導ラマン散乱が、このような超広帯域伝送における深刻な制限要因となることを明らかにした。

これを受け、一本のファイバで 10 Tb/s 容量を実現することを目指し、変調速度 40 Gb/s で 273 波を波長多重し、伝送路 117km の総容量 10.92 Tb/s 光中継伝送を行った。利得シフト TDFA の帯域に 85 波もの 40 Gb/s 信号を入力した。前章までに開発した利得シフト TDFA は、40 Gb/s 信号に耐えうる低い偏波モード分散(0.1 ps)、広帯域(30 nm)、高利得(>20 dB)、低雑音(<7 dB)、高出力(+21.5 dBm)を有することで、世界で初めて最高速度での動作に成功した。非線形効果(相互位相変調、自己位相変調、4 光波混合)やパターン効果なども、少なくとも本実験では観測されず、今後さらなる高性能伝送システムの構築に、重要な飛躍を与えた。

【今後の展望】

今後の展望として、ツリウム添加フッ化物ファイバのさらなる信頼性向上が課題と考える。第 3 章、第 4 章でそれぞれの励起方式における信頼性について述べた。本研究の実験においては、低雑音励起では励起光源のアイソレーションで、高効率励起では半導体レーザー励起採用による光源の出力安定化と緑青色蛍光の抑制により、ほぼ実験室レベルでの長期安定性(数ヶ月~1 年)は実証された。しかしながら、突発的な光損傷の原因は未解明であり、また励起状態での信頼性評価試験も報告されていない。実用装置では 10 年以上(10 万時間)の装置寿命は保証しなければならない。Tm ファイバの材料面での研究開発が進むことで、より一層実用化へ近づくと考える。

一方、伝送技術に目を転じると、超広帯域伝送にともなう誘導ラマン散乱がシステム性能の制限要因として浮上してきた。本研究では、その抑制手法(例えば、伝送路ファイバのコア径の拡大)や対策(分布ラマン増幅)などを講じてきた。しかし今後、さらなる高機能な伝送システム構築のためには、利得シフト TDFA の性能改善と、これら伝送技術の進展が、両輪のごとく推し進められなければならない。まさしく本研究では先駆者として、この両輪を推進してきた。本研究を境に超広帯域伝送が今まさに幕開けしたと言える。ラマン増幅器や半導体光増幅器など、利得シフト TDFA と競合する技術も、裏を返せば、複合化によりお互いに相補うことができ、利得シフト TDFA が実用レベルに極めて近づいた今、これらを合わせ用いて、新たな光伝送システム、高機能フォトニックネットワークを構築していくことが望まれている。

謝辞

本論文をまとめるにあたり終始懇切かつ丁寧な御指導、御助言を賜りました、京都大学大学院 工学研究科 電子物性工学専攻 松波弘之 教授、野田進 教授、北野正雄 教授、藤田茂夫 教授に心から感謝の意を表します。

また本論文の進め方について多大なる御教示を賜りました、京都大学名誉教授 川端昭先生に誠に感謝致します。また公私共に御指導いただく 姫路工業大学 工学部電子工学科 清水勝 助教授には、本論文執筆にあたり、終始気に掛けてくださり、絶えず激励を頂きました。ここに深く感謝致します。

本研究は著者が日本電気株式会社 光・無線デバイス研究所（旧 光エレクトロニクス研究所）およびネットワークング研究所において行ったものです。本研究の機会を与えていただき多大な御指導と御鞭撻を賜った、NEC ラボラトリーズ 小川正毅 エグゼクティブエキスパート（元 光・無線デバイス研究所 所長）、ネットワークング研究所 鹿田實 所長、ネットワークング研究所 藤原雅彦 統括マネージャ（元 光・無線デバイス研究所 光集積テクノロジーグループ部長）、第一光ネットワーク事業部 製品企画部 江村克己 部長（元 ネットワークング研究所 光ネットワークテクノロジーグループ部長）、ネットワークング研究所 光ネットワークテクノロジーグループ 中村真也 部長に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、共同研究者として終始活動を共にしました、第一光ネットワーク事業部 矢野隆 主任（元ネットワークング研究所）、ネットワークング研究所 光ネットワークテクノロジーグループ 小野隆志 主任研究員、福知清 主任研究員、伊東俊治 主任、関谷かや人氏、森江正夫氏、小笠原大作氏、矢ヶ部喜之氏、大平理覚 主任（現光デバイス事業部）に大変感謝いたします。特に矢野主任とは、この研究のまさに最初から一緒に実験を進めて参り、3 波帯伝送を初めて実証できました。

また本論文の中で、半導体レーザ励起固体レーザの研究においては、入社以来、研究の最初から大変な御指導を賜りました サイバーレーザー株式会社 関田仁志氏（元 光エレクトロニクス研究所）に深く感謝いたします。また共同研究者として、元固体レーザグループの同僚 ネットワークング研究所 関祐子 主任、レーザソリューション事業部 多田昭史 エキスパート（元 光エレクトロニクス研究所）、サイバーレーザー株式会社 住吉哲実氏、白鳥明氏に感謝いたします。

最後に日頃から励ましといたわりで私を支えてくれた妻の由紀に心より感謝いたします。

付録 A ツリウム添加ファイバ増幅器の数値計算パラメータの 推定手法と計算アルゴリズム

A.1 数値計算パラメータの推定手法

第 2 章 2.3.4 節に述べた利得シフト TDFA の数値モデルにおいて、計算に用いる物性定数やファイバの導波構造パラメータの推定、算出方法を示す。ほとんどの物性定数の測定は非常に難しく、ファイバ形状での高精度な測定は出来ない。そのため既報告文献より値を抽出し、推定する作業を行った。

A.1.1 自然放出レートと非放射遷移レート

ツリウム添加フッ化物ガラスに対し、遷移確率の量子力学計算すなわち Judd-Offelt 解析 [1]を行っている文献[2, 3]より、自然放出レート A_{10} , A_{30} , A_{50} , A_{52} を抽出した。また、次式(A-1)に示す非放射遷移レート w_{NR} を用いた[4]。フッ化物中での最大フォノンエネルギー $\hbar\omega=500 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha=5.19 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 、 $C=1.59 \times 10^{10} \text{ 1/s}$ とした。ツリウムのエネルギー準位間のエネルギー間隔 ΔE 、動作温度 $T=300 \text{ K}$ を用いて、計算により非放射緩和レート A_{43} A_{21} を求め、その結果を表 2-3 に記載した。ただし (A-1) 式の指数 p は、エネルギー間隔 ΔE を超える最小の整数であり、物理的には、そのエネルギー間隔を繋ぐ(越える)のに必要な最小のフォノン数である。またフォノンは(A-2) 式に示すように、ボーズ・アインシュタイン分布に従っている。

$$w_{NR} = C[n(T)+1]^p \exp(-\alpha\Delta E) \quad (\text{A-1})$$

$$n(T) = 1/[\exp(\hbar\omega/kT)+1] \quad (\text{A-2})$$

A.1.2 信号帯域の遷移断面積 σ_{se} σ_{sa}

信号帯域の誘導放出断面積 σ_{se} と吸収断面積 σ_{sa} を見積もる。誘導放出断面積 σ_{se} は最も重要なパラメータであるにもかかわらず、非常に既報告データが少なく、しかも値がばらばらについている。すなわち文献により $1.8 \sim 6.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ もの範囲が報告されている。

まず準位 $j \rightarrow j'$ への発光遷移を考える。固体中の希土類イオンの発光、吸収を取り扱う量子力学理論 Judd-Offelt 理論[1, 5, 6]から、自然放出レート $A_{jj'}$ と誘導放出断面積 σ_e の間に、

$$\sigma_e = \frac{\lambda_{peak}^2}{8\pi n^2 \Delta\nu_{eff}^2} A_{jj'} \quad (A-3)$$

の関係がある。ただし、 n ：屈折率、 $\Delta\nu_{eff}$ ：蛍光スペクトルの有効幅、 λ_{peak} ：蛍光ピークである。本研究で注目している $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ 遷移の場合、文献[3]より $A_{jj'}=73 \text{ 1/s}$ である。文献[7]より ZBLAN ガラスの屈折率 n は波長の関数として次式の Cauchy の式で書ける。

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (A-4)$$

ただし $A=1.50583$ 、 $B=3478.14 \text{ nm}^2$ である。したがって、 $\lambda=1490 \text{ nm}$ とした場合、 $n=1.507$ である。実測より $\Delta\lambda_{eff}=50 \text{ nm}$ とすると、 $\sigma_e=4.0 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ となる。他の文献からは、1.8 [8]、2.1 [9]、2.4 [10]、6.7 [11] (全て $\times 10^{-21} \text{ cm}^2$) とばらついている。このばらつきの原因は、測定精度によるものとホストガラス組成の微妙な違い(全て、いわゆる ZBLAN 組成だが、材料組成の混合比率が僅かに異なるものと考えられる)によるものの 2 つからの寄与と考えている。

しかしながら、誘導放出断面積の絶対値はシミュレーションを行う上で、非常に重要な要素であり、確からしい推定が必要である。ここでは予備検討として、 $\sigma_{se}=1.8 \sim 6.7 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ の間で値を変化させ、数値計算で増幅特性の変化を見た。特に利得の励起パワー依存性(図 3-9)において、高励起パワーでは、誘導放出断面積で利得が決まること[11]から、励起パワー 200 mW での利得を断面積推定の指標とした。その結果 $\sigma_{se}=2.4 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ あたりが非常に良く一致していることを確認した。またプロファイルは文献[12]を参考にした。

信号帯域の(励起状態)吸収遷移 σ_{sa} についてもデータが乏しい。プロファイルは 2001 年の光アンプ国際会議(OAA2001)において報告[13]されたが、吸収断面積ピーク値は不明である。ピーク値の推定には、以下の 2 種類の関係式を使う手法が知られている。すなわち、第 1 に Fuchtbauer-Landenburg(FL)の関係式 [(A-5)式]を使うものである[14]。

$$g_j \int \sigma_a(\nu) d\nu = g_{j'} \int \sigma_e(\nu) d\nu \quad (A-5)$$

ただし、 $g_j, g_{j'} = 2J(J'+1)$ ：各準位の縮退度 (J, J' はエネルギー準位のラッセル・サンダース表記における全角運動量量子数 = 右下の添え字) であり、 $^3F_4 \rightarrow ^3H_4$ 遷移の場合、 $J, J'=4$ である。

第 2 に McCumber の関係式[15][次式(A-6)]を用いるものである。

$$\sigma_{se}(\nu) = \sigma_{sa}(\nu) \exp\left(\frac{\varepsilon - h\nu}{kT}\right) \quad (\text{A-6})$$

ただし、 ε ：温度依存性を持つ励起エネルギー（この 2 準位系のギブス自由エネルギーに相当）である。

前者（FL 関係式）においては、(A-5)式の関係式が成り立つためには以下の

- ・ 各マニフォールド（ 3F_4 、 3H_4 準位）の中の、Stark 準位が等間隔に分裂している。
- ・ 各シュタルク準位からの遷移強度は、全て等しい。

のどちらかの仮定が満たされなくてはならず、一般的にガラス中の希土類イオンでは成り立たない[14]。一方、McCumber 関係式は、ただ一つの仮定：「熱緩和にいたる時間は励起寿命より十分に小さい」に基づいている。この条件は、関与する原子数が多い固体やガラスなどでは一般的に満たされ得る（逆に関与する原子数が少ない気体などでは気をつける必要がある）。ただし上記の励起エネルギー ε を理論的に推定することが難しい。

そこで励起エネルギーを仮定し、McCumber 関係式から吸収プロファイルが文献[13]と整合するようにして、励起エネルギーを推定した。その結果、 $\varepsilon = 1435 \sim 1440$ nm あたりで最もよく合致することが分かり、同時に励起状態吸収 σ_{sa} のピーク値は、誘導放出断面積のおよそ 70% であることが分かった。実際に精度良く測定した結果が無いため、この値を最も確からしい値として計算を行った。

計算に用いた信号帯域の誘導放出・吸収断面積のプロファイルを図 A-1 に示す。

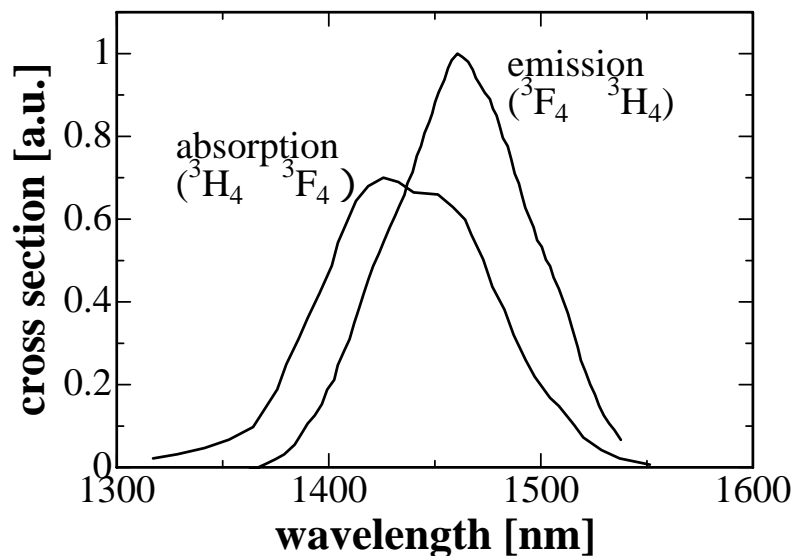


図 A-1 信号帯域の誘導放出・吸収断面積

A.1.3 1.05 μm 励起光の吸収断面積 σ_{p1} , σ_{p2} , σ_{p3}

励起吸収断面積 σ_{p1} は $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ 遷移（基底状態吸収遷移）の吸収の裾野に位置し、非常に微弱なため測定が難しい。また σ_{p2} , σ_{p3} は励起状態吸収であり、一般的に測定データが乏しい。

文献[11]では波長 1064 nm での値として、 $\sigma_{p1}=1.1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_{p2}=8.2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_{p3}=1.0 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$ としてある。また文献[16]によれば、1064 nm でのツリウムファイバでの吸収値は 0.10 dB/m(1200 ppm、12 m)であることが記載されており、これからは $\sigma_{p1}=1.31 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ が算出できる。波長 1047 nm での値は、全ての文献で記載が無いが、励起状態吸収プロファイルから 1064 nm での値とほとんど同程度と考えられるため、文献[11]に従い $\sigma_{p1}=1.1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ とした。

また σ_{p2} の値もほとんどの文献で記載が無い。文献[17]に、励起状態吸収のスペクトルが記載されている（絶対値は不明）。基底状態吸収（ $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{H}_5$ ）のピーク値（ $5.0[11] \sim 5.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2[18]$ 波長 1.21 μm ）と、励起状態吸収 σ_{p2} のピーク値とがほとんど等しい様相を文献[17]から確認できるため、おそらく $\sigma_{p2}=5.0 \times 10^{-21} \sim 1.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 程度と考えられる。ここでは文献[11]に従い、中間付近の $\sigma_{p2}=8.2 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ とした。

さらに σ_{p3} のデータもほとんど無い。文献[11]を参考にして、波長 1047 nm であることを考慮し、プロファイル[18]から $\sigma_{p3}=2.5 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ とした。図 A-2 に吸収断面積プロファイルを示す。

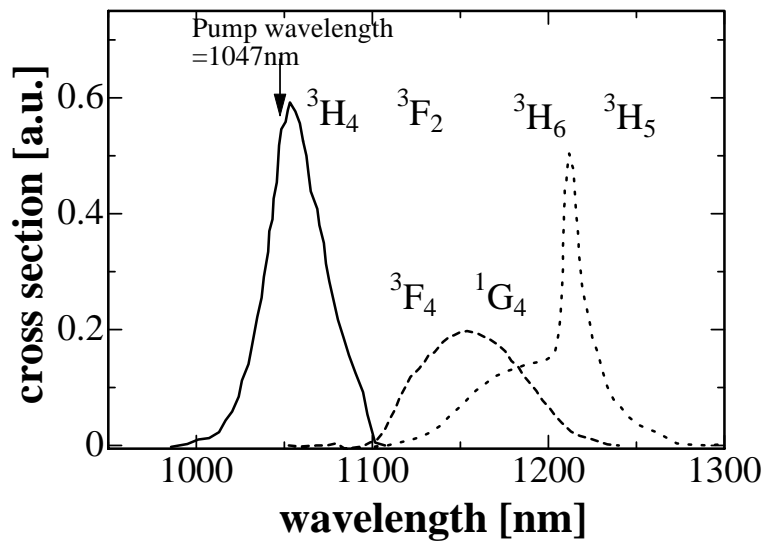


図 A-2 1.05 μm 励起波長での吸収断面積

A.1.4 1.56 μm 励起光の吸収断面積 σ_{p4}

波長 1.56 μm での吸収断面積も、ほとんど報告されていない。しかしプロファイルおよび絶対値は、文献[4]に記載されているものから読み取れる。さらに手持ちのツリウム添加ファイバと白色光源を用いて、吸収損失を測定した結果、図 A-3 のようなプロファイルを得た。これを数値計算に用いた。

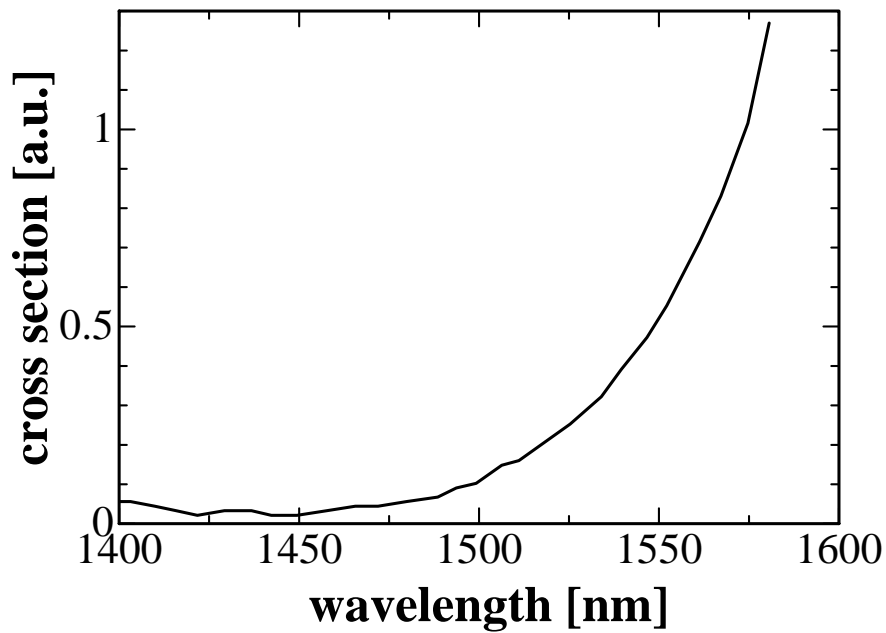


図 A-3 1.56 μm 帯域での吸収断面積

A.1.5 ファイバパラメータ

メーカー（NTT エレクトロニクス）の開発技術者である大石泰丈氏に密度を問い合わせることにより算出した。密度は 4.7 g/cm^3 であり、濃度はおよそ $1.68 \times 10^{19} \text{ 1/cm}^3$ となる。これは標準的な ZBLAN での値とほぼ同じと考えられる[19, 20]。コア径、屈折率差、背景損失は仕様書、カタログより入手した。開口数（NA）、オーバーラップ効率などの因子は上記のパラメータより計算により算出した。オーバーラップ因子は次式(A-7)で表される[21,22]。

$$\Gamma(\lambda) = 1 - \exp \left[-2 / \left(0.65 + \frac{1.19}{V^{1.5}} + \frac{2.879}{V^6} \right)^2 \right] \quad (\text{A-7})$$

A.2 数値計算のアルゴリズム

ファイバ増幅器シミュレータ全般に共通なこととして、逆方向励起光、逆方向 ASE 光に対してファイバ入射端 ($z=0$) の初期条件を、正方向の励起光、信号光、ASE 光に対しては出射端 ($z=L$) の初期条件を先験的に与えられない。従って光波の伝搬に関する連立微分方程式[第 2 章(2-30)~(2-35)式と(2-41)、(2-42)式]は、入射端 ($z=0$)、出射端 ($z=L$) における境界を有し、境界値が一部のみ規定されている「部分的な境界値問題」に帰着する。

「境界値問題」に対する解法は幾つかあるが、代表的なものは「狙い打ち法 (Shooting method)」、 「反復法 (Back and forth method)」である[23, 24]。ここでは収束性を考慮し反復法を用いている[25-27]。

計算の最初には、吸収飽和が無いという仮定のもとで逆方向励起光と逆方向 ASE 光の入射端でのパワーを推定する。さらにこれらの値を用いて、Tm ファイバ中を前方へ向かって進む光波について数値積分を進める。さらに得られた出射端 $z=L$ での値を用いて、逆方向に数値積分を行う。系全体が収束に達するまでこの反復計算を繰り返す。ここでは誤差の累積が少なく、収束速度が高い 4 次のルンゲ・クッタ法を用いた[28]。

また、雑音指数の計算精度を高めるため、1380 ~ 1550 nm の ASE スペクトルを 1 ~ 4 nm 間隔に分割し、伝搬方程式(2-33)式に組み入れている。すなわち EDFA における最も厳密な手法 Giles-Desurvire モデル[25]に相当する。

実際の数値シミュレーションでは、数値精度を見ながら、ファイバの z 軸方向の分割数を 50 から 1000、反復回数は 10 ~ 40 回、信号帯域 ASE のスペクトル幅は 1 ~ 4 nm とした。もちろん分割数と反復回数は大きいほど、ASE スペクトル幅は小さいほど計算精度は高まるが、そのぶん計算時間も必要である。典型的な場合、分割数 200、反復回数 10 回、ASE スペクトル幅 2 nm として、精度は 0.01% 以下であり、計算時間はおよそ 30 分であった。ただし、非常に増幅器の飽和度が高い場合 (励起パワーが低いか信号パワーが高い)、非常に収束が遅いことがあった。これは連立常微分方程式がいわゆる「硬い (stiff)」ものであるためである[29]。つまり飽和状態では、ファイバ出射端で励起パワーはほぼ零 ($<10^{-30}$) になってしまうが、数値計算上は計算機精度の限界まで小さい数 (例えば 30 桁、 1.0×10^{-34}) を指定することが必要である。この状況では、逆方向に数値積分を進め入射部分での境界条件と比較すると、非常に誤差が大きくなる。これが収束の極めて遅い理由である。

プログラム化には、数値計算・数式処理ソフトウェア「*Mathematica* ver. 3.0」(Wolfram Research 社)を用いた。計算速度を向上させるには、より高速な演算が可能な「*Matlab*」(The MathWorks 社)や FORTRAN 言語を用いると良い[30]。

付録 B 光スペクトルアナライザを用いた 雑音指数測定における注意点

元来、雑音指数の測定は、非常に難しいタイプのものである。強度の高い信号レベル(0 dBm)に隠された微弱な雑音レベル (-30 ~ -40 dBm) を測定するため、測定誤差が生じやすい(図 B-1 参照)。そこで確度の高い測定を行うには、測定手法の選択と測定器の使用方法において注意が必要である。

測定方法としては、ASE 補間法、偏光ヌリング法、パルスプローブ法の 3 種類が考えられる[31]。このうち 3 番目の「パルスプローブ法」は最も信頼性が高い手法として、光増幅器測定システムとして市販されている。製造現場ではこの方法により利得・雑音指数の測定を行っている。一方、「ASE 補間法」は、光スペクトラムアナライザ(光スペアナ)のみで測定でき、実験室レベルでは最も簡易で素早い測定ができるが、前述の信号に埋もれた ASE パワーの測定に誤差が生じやすい。ここでは光スペアナで高確度測定を行う際の留意点、光スペアナを用いた ASE 補間法と、パルスプローブ法の測定結果の比較を述べる。

まず雑音指数測定における誤差要因を分析する。通常、信号ショット雑音と信号 - ASE 間ビート雑音が支配的であり、雑音指数は以下のような式[第 2 章(2-11)式]で算出される[25]。

$$NF = \frac{1}{G} + \frac{P_{ASE}}{h\nu_s \Delta\nu G} \quad (B-1)$$

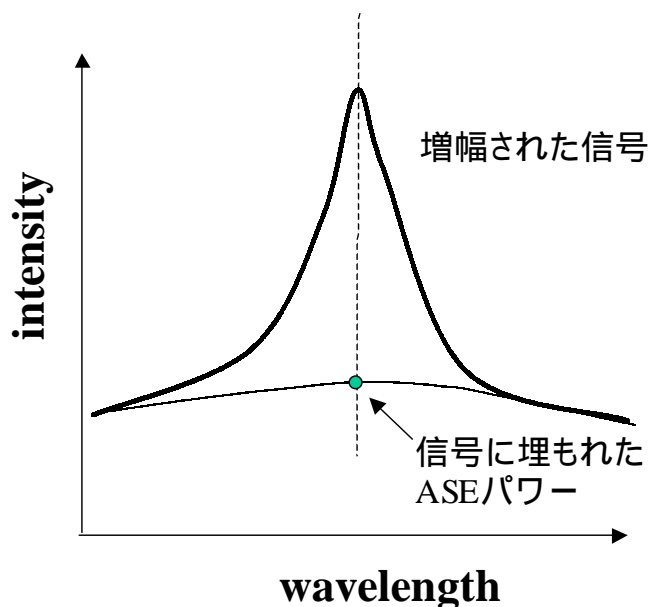


図 B-1 信号と雑音スペクトルの概念図

ただし G : 利得、 P_{ASE} : ASE パワー、 $h\nu_s$: 信号光子エネルギー、 $\Delta\nu$: 測定器分解能である。ここで上式は高利得状態では、自然放出パラメータ $2n_{sp} = P_{ASE}/h\nu_s\Delta\nu(G-1)$ と一致する。またショット雑音項 $1/G$ を省略して計算することも多い。本研究では全て(B-1)式により雑音指数を計算している。

さて、高利得状態を考え、(B-1)式中の第 1 項の信号ショット雑音項を無視し、両辺の対数を取り微分操作を行うと、雑音指数の誤差要因の分解ができる。

$$\frac{\Delta NF}{NF} = \left| \frac{\Delta P_{ASE}}{P_{ASE}} \right| + \left| \frac{\Delta(h\nu_s)}{h\nu_s} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta\nu)}{\Delta\nu} \right| + \left| \frac{\Delta G}{G} \right| \quad (B-2)$$

となる。ここで各項の Δ は測定誤差を表す。このうち、第 1 項の ASE 成分の測定誤差は、ASE 補間法ではフィッティング誤差が生じやすい。パルスプローブ法では、それを極小に抑制できる。第 2 項は、測定器の波長精度、第 4 項は線形性に依存し、おのおの 0.1 dB 以下と推定される。第 3 項の分解能の確度には以下に示すように若干注意が必要である。

今回、比較のため、光スペクトラムアナライザ 3 台(アジレント 81640A、アンドウ AQ6317Q、アンリツ MS9710C)を用いて、測定された値を相互に比較した。測定における分解能に関する注意点は以下の通りである。

アジレント : 雑音レベル測定においては、通常マーカを用いるのではなく、必ず「ノイズマーカ」を用いる。通常マーカでの測定では、最大 1 dB 程度真値より小さな値が計上される。これはアジレントの装置設計に依存しているが、雑音レベルの値を正確に測定するために、分光器のフィルタ形状をガウス型から矩形へと変換する特別なマーカの使用が必要なので注意。

アンドウ : 「Resolution Correct」機能を「ON」とすることで、分解能確度を向上させる。これを行わないと、分解能確度が著しく低下する。

アンリツ : 特に操作は必要ないが、「ActiveRes ON」とすることで、実際の分解能幅を表示し、確度向上。下記の自動測定系においても、このモードで測定している。

以上の注意を払い、L バンド EDFA を測定した結果を図 B-2 に示す。アジレントとアンドウは雑音指数の差でおおよそ 0.2 dB、アジレントとアンリツの差は 0.2 ~ 0.5 dB 程度であった。

一方、自動測定器では公称測定確度 0.3 dB を謳っており、現在最も確からしい測定であると考えている。光スペアナ(アジレント)との比較を図 B-3 に示す。両者は 0.2 から 0.4 dB 程度の差で、測定できていることが分かった。最長波の測定がかけ離れているのは、なんらかの誤差が発生した可能性があると考えている。

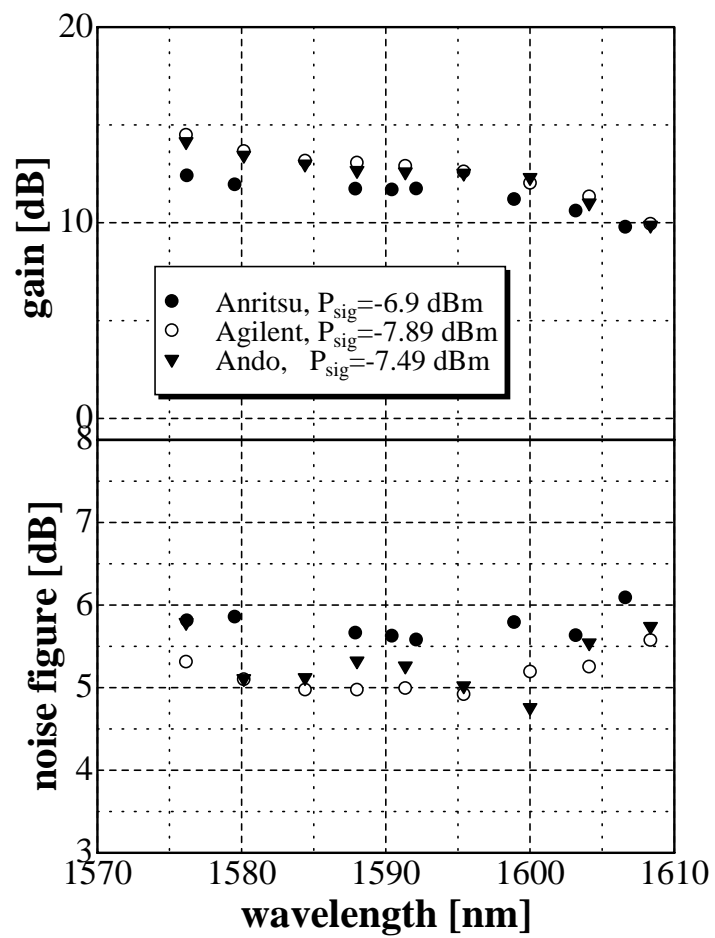


図 B-2 光スペクトラムアナライザによる ASE 補間法の測定結果比較
(測定対象は L バンド EDFA)

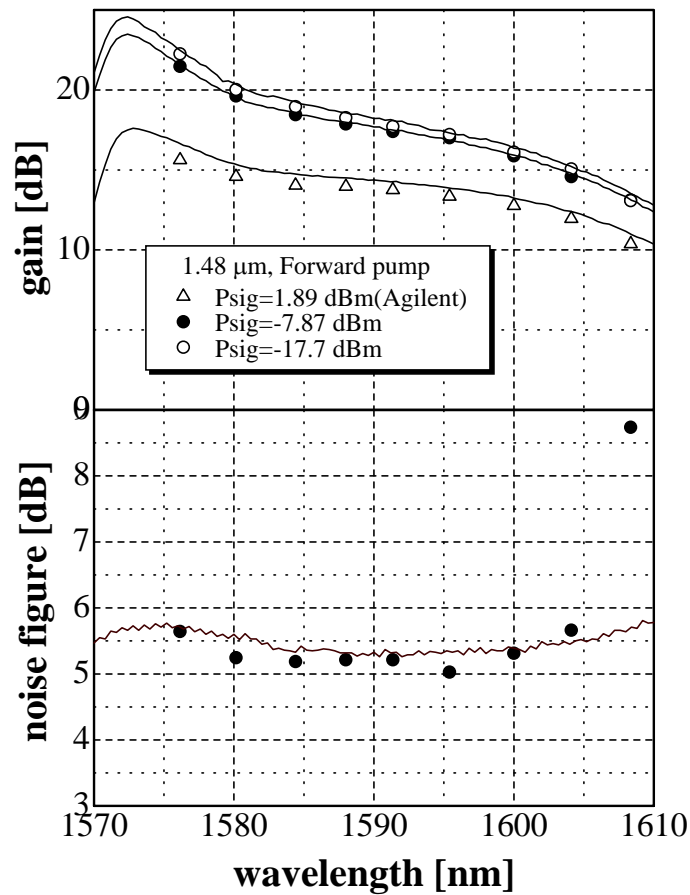


図 B-3 光スペクトラムアナライザによる測定(アジレント)と自動測定 (実線) の比較
(測定対象は L バンド EDFA)

付録参考文献

- [1] 櫛田孝司、「光物性物理学」、朝倉書店、第 5 章、pp. 121-124、1991 年。
- [2] C. Guery, J. L. Adam, and J. Lucas, "Optical properties of Tm^{3+} ions in indium-based fluoride glasses," J. Luminescence, vol. 42, pp. 181-189, 1988.
- [3] J. Sanz, R. Cases, and R. Alcalá, "Optical properties of Tm^{3+} in fluorozirconate glass," J. Non-Crystal. Solids, vol. 93, pp. 377-386, 1987.
- [4] W. J. Miniscalco, "Optical and electronic properties of rare earth ions in glasses," in *Rare earth doped fiber lasers and amplifiers*, ed., M. J. F. Digonnet, Marcel Dekker, Inc., New York, 1993.
- [5] N. Spector, R. Reisfeld, and L. Boehm, "Eigenstates and radiative transmission probabilities for Tm^{3+} ($4f^{12}$) in phosphate and tellurite glasses," Chem. Phys. Lett., vol. 49, no. 1, pp. 49-53, 1977.
- [6] R. Reisfeld and Y. Eckstein, "Dependence of spontaneous emission and nonradiative relaxations

- of Tm^{3+} and Er^{3+} on glass host and temperature,” J. Chem. Phys., vol. 63, no. 9, pp. 4001-4012, 1975.
- [7] M. D. Shinn, W. A. Sibley, M. G. Drexhage, and R. N. Brown, “Optical transitions of Er^{3+} ions in fluorozirconate glass,” Phys. Rev. B, vol. 27, no. 11, pp. 6635-6648, 1983.
- [8] M. Naftaly, S. Shen, and A. Jha, “ Tm^{3+} -doped tellurite glass for a broadband amplifier at 1.47 μm ,” Appl. Opt., vol. 39, no. 27, pp. 4979-4984, 2000.
- [9] R. M. Percival, D. Szebesta, and S. T. Davey, “Highly efficient CW cascade operation of 1.47 and 1.82 μm transitions in Tm-doped fluoride fibre laser,” Electron. Lett., vol. 28, no. 20, pp. 1866-1868, 1992.
- [10] R. Allen, L. Esterowitz, and I. Aggrawal, “An efficient 1.46 μm thulium fiber laser via a cascade process,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 29, no. 2, pp. 303-306, 1993.
- [11] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm ,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 31, no. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [12] 清水誠, 「1460-1620nm 帯光ファイバー増幅器」, O plus E 誌、第 23 巻第 9 号、pp.1053-1060、2001 年.
- [13] S. Guy, W. Meffre, A. M. Jurdyc, B. Jacquier, F. Roy, P. Baniel, D. Bayart, A. Le. Sauze, C. Collet, and J. J. Girard, “Spectroscopic studies of Tm doped glasses for S-band amplifiers,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications* (OAA2001), paper OWB5, 2001.
- [14] W. J. Miniscalco and R. S. Quimby, “General procedure for the analysis of Er^{3+} cross sections,” Opt. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 258-260, 1991.
- [15] D. E. McCumber, “Theory of phonon-terminated optical masers,” Phys. Rev., vol. 134, no. 2A, pp. A299-A306, 1964.
- [16] R. M. Percival and J. R. Williams, “Highly efficient 1.064 μm upconversion pumped 1.47 μm thulium doped fluoride fibre amplifier,” Electron. Lett., vol. 30, no. 20, pp. 1684-1685, 1994.
- [17] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi, and M. Shimizu, “Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, no. 10, pp. 1331-1333, 2000.
- [18] R. S. Quimby and X. Song, “Excited-state absorption spectra in Tm^{3+} -doped fluoride glass,” in *Proc. Conference on Lasers and Electro-optics* (CLEO’93), paper CThF5, 1993.
- [19] ルベールフルオール社カタログ

- [20]M. Pollnau, R. Spring, Ch. Ghisler, S. Wittwer, W. Lüthy, and H. P. Weber, "Efficiency of erbium 3- μ m crystal and fiber lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 32, no. 4, pp. 657-663, 1996.
- [21]D. Marcuse, "Loss analysis of single-mode fiber splices," Bell System Tech. J., vol. 56, no. 5, pp. 703-718, 1977.
- [22]T. J. Whitley and R. Wyatt, "Alternative Gaussian spot size polynomial for use with doped fiber amplifiers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, no. 11, pp. 1325-1327, 1993.
- [23]W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes: The art of scientific computing*, Cambridge University Press, Chapter 16, 1986.
- [24]大野豊、磯田和男、「数値計算ハンドブック」, オーム社、pp. 260-288, 1990.
- [25]C. R. Giles and E. Desurvire, "Modeling erbium-doped fiber amplifiers," J. Lightwave. Technol., vol. 9, no. 2, pp. 271-283, 1991.
- [26]E. Desurvire, *Erbium-doped fiber amplifiers: Principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chapter 1, 1994.
- [27]P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers: Fundamentals and technology*, Academic Press, Chapter 4, 1999.
- [28]洲之内治男、「数値計算」, サイエンス社、第4章、1978年.
- [29]W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, and W. T. Vetterling, *Numerical Recipes: The art of scientific computing*, Cambridge University Press, Chapter 15, 1986.
- [30]山本喜一、榊原進、野寺隆志、長谷川秀彦、「これだけは知っておきたい数学ツール」, 共立出版社、1999年.
- [31]アンリツ、「アプリケーションノート 光増幅器 (EDFA) の測定」, 1997年.

本研究に関連する発表

* : 本論文に内容を含むもの

I. 学術論文（主著書）

- [1] T. Kasamatsu, M. Tsunekane, H. Sekita, Y. Morishige, and S. Kishida, “1 pm spectrally narrowed ArF excimer laser injection-locked by 4th harmonic seed source of 773.6 nm Ti:Sapphire laser,” Appl. Phys. Lett., vol. 67, no. 23, pp. 3396-3398, 1995.
- [2] T. Kasamatsu and H. Sekita, “Laser-diode-pumped Nd:YAG active-mirror laser,” Appl. Opt., vol. 36, no. 9, pp. 1879-1881, 1997.
- [3] 笠松直史、関田仁志、森重幸雄、「アクティブミラー方式 LD 励起 Nd:YAG レーザー」、レーザー研究、第 24 巻第 3 号、pp. 373-379、1996 年.
- [4] *T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano, “Temperature dependence and optimization of 970-nm diode-pumped Yb:YAG and Yb:LuAG lasers,” Appl. Opt., vol. 38, no. 24, pp. 5149-5153, 1999.
- [5] *T. Kasamatsu, T. Sumiyoshi, and H. Sekita, “Laser-diode-pumped Yb:YAG laser as a new pump source and its application to an Er^{3+} , Yb^{3+} -codoped high-output-power fiber amplifier,” Appl. Phys. B, vol. 69, pp. 491-495, 1999.
- [6] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, “1.50- μm -band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μm dual-wavelength pumping,” Opt. Lett., vol. 24, no. 23, pp. 1684-1686, 1999.
- [7] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-diode pumping (1.4 and 1.56 μm) of gain-shifted thulium-doped fibre amplifier,” Electron. Lett., vol. 36, no. 19, pp. 1607-1609, 2000.
- [8] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51- μm wavelength region,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, no. 1, pp. 31-33, 2001.
- [9] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-diode-pumped highly-efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 13, no. 5, pp. 433-435, 2001.
- [10] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “1.49- μm -band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for WDM transmission systems,” IEEE J. Lightwave Technol., *accepted for publication*.

II. 国際学会（主著書）

- [11] T. Kasamatsu, M. Tsunekane, H. Sekita, Y. Morishige, and S. Kishida, “1 pm spectrally narrowed ArF Excimer laser injection-locked by 4th harmonic seed source of 773.6 nm Ti:Sapphire laser,” in *Proc. Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers (ASSL’95)*, February 1995, *Memphis*, postdeadline paper PD-12.
- [12] T. Kasamatsu and H. Sekita, “Laser-diode-pumped Nd:YAG active-mirror laser,” in *Proc. Photon Technology Workshop*, March 1996, *Tsukuba*, paper L-4.
- [13] *T. Kasamatsu, H. Sekita, and Y. Kuwano, “Temperature-optimized operation of 970-nm diode-pumped Yb:YAG and Yb:LuAG lasers,” in *Proc. Topical Meeting on Advanced Solid-State Lasers Topical Meeting (ASSL’98)*, February 1998, *Coeur d’Alene*, paper AWB2.
- [14] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, “Novel 1.50- μ m band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier by using dual wavelength pumping of 1.05 μ m and 1.56 μ m,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA’99)*, June 1999, *Nara*, postdeadline paper PDP1.
- [15] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for future broadband DWDM networks,” in *Proc. Optoelectronic and Communications Conference (OECC2000)*, July 2000, *Makuhari*, paper 14B4-1 (**invited**).
- [16] *T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-diode-pumped highly-efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480-1510-nm band,” in *Proc. Optical Fiber Communications Conference (OFC2001)*, March 2001, *Anaheim*, paper TuQ4.
- [17] *T. Kasamatsu, “Gain-shifted thulium-doped fiber amplifier for S-band,” in *Proc. The Rank Prize Funds Symposium, Broadband Optical Amplifiers*, June 2001, *Grasmere, United Kingdom*, Session1 (**invited**).
- [18] *T. Kasamatsu and Y. Yano, “Tm-doped fiber amplifier for S-band,” in *Proc. Topical Meeting on Optical Amplifiers and Their Applications (OAA2001)*, July 2001, *Stresa, Italy*, paper OWB1 (**invited**).
- [19] *T. Kasamatsu, “Exploring new transmission band –S-band amplifiers and next–,” in *Proc. Optoelectronics and Communication Conference (OECC2002)*, July 2002, *Yokohama*, paper 9D1-3 (**invited**).

III. 解説記事（主著書）

- [20]*笠松直史、「利得シフト・ツリウム添加ファイバ増幅器」、レーザー研究、第 29 巻第 9 号、pp. 582-589、2001 年.
- [21]*笠松直史：「利得シフト・ツリウム添加光ファイバー増幅器」、O plus E 誌、第 24 巻第 4 号、pp. 388-395、2002 年.

IV. 国際学会（共著書）

- [22]*Y. Yano, T. Kasamatsu, Y. Yokoyama, and T. Ono, “Experimental study on SRS loss and its compensation in three-band WDM transmission,” in *Proc. European Conference on Optical Communications (ECOC2000)*, Munich, Germany, September 2000, paper 7.2.6, vol. 3, pp. 39-40.
- [23]*K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara, and T. Ono, “10.92-Tb/s (273x40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment,” in *Proc. Optical Fiber Communication Conference (OFC2001)*, Anaheim, March 2001, postdeadline paper PD24.
- [24]*T. Ito, K. Fukuchi, and T. Kasamatsu, “Enabling technologies for 10 Tb/s transmission capacity and beyond,” in *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC2001)*, Amsterdam, The Netherlands, September 2001, paper Th.B. 2.3, vol. 4, pp. 598-601 (**invited**).

V. 国内学会発表（主著書）

- [25]笠松直史、常包正樹、森重幸雄、岸田俊二、「高調波注入同期方式狭帯域 ArF エキシマレーザ」、1994 年（平成 6 年）春季 第 4 1 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集 第 3 分冊 29a-E-1（p. 928）.
- [26]笠松直史、常包正樹、森重幸雄、岸田俊二、「高調波注入同期同期方式 ArF エキシマレーザ（ ）～波長安定性評価」、1994 年（平成 6 年）秋季 第 5 5 回応用物理学学術講演会 講演予稿集 第 3 分冊 19p-F-10（p. 862）.
- [27]笠松直史、常包正樹、森重幸雄、岸田俊二、「高調波注入同期同期方式 ArF エキシマレーザ」

- ーザ () ~シード光の全固体化」、1994年(平成6年)秋季 第55回応用物理学
 学術講演会 講演予稿集 第3分冊 19p-F-11 (p. 863)。
- [28]笠松直史、関田仁志、森重幸雄、「アクティブミラー方式 LD 励起 Nd:YAG レーザ」、
 1995年(平成7年)秋季第56回応用物理学学術講演会 講演予稿集 第3分冊
 27a-D-9 (p. 842)。
- [29]笠松直史、関田仁志、多田昭史、小椋行夫、「アクティブミラー方式 LD 励起 Nd:YAG
 レーザ (II) - 高出力化 - 」、1996年(平成8年)秋季第57回応用物理学学術
 講演会 講演予稿集 第3分冊 7p-M-7 (p. 830)。
- [30]*笠松直史、関田仁志、多田昭史、住吉哲実、桑野泰彦、「LD 励起アクティブミラー
 Yb:YAG レーザー」、1997年(平成9年)レーザー学会学術講演会第17回年次大
 会 講演予稿集 23aVI8 (p. 46)。
- [31]*笠松直史、住吉哲実、関田仁志、「Yb:YAG レーザ励起 Yb 共添加高出力 Er ファイバ
 アンプ」、1999年(平成11年)春季第46回応用物理学関係連合講演会 講演予稿
 集 第3分冊 28a-F-8 (p. 1235)。
- [32]*笠松直史、矢野隆、関田仁志、「2 波長励起方式 (1.05/1.56 μ m) による Tm 添加ファイ
 バ増幅器の利得向上と長波シフト」、1999年(平成11年)電子情報通信学会エレ
 クトロニクスソサイエティ大会、C-3-75。
- [33]*笠松直史、矢野隆、関田仁志、「2 波長励起方式 (1.05/1.56 μ m) を用いた利得シフト
 Tm 添加ファイバ増幅器」、2000年(平成12年)電子情報通信学会総合大会、C-3-30
 (招待講演)。
- [34]*笠松直史、矢野隆、小野隆志、「利得シフト Tm 添加ファイバ増幅器の LD 励起動作」、
 2000年(平成12年)電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、C-3-91。
- [35]*笠松直史、矢野隆、小野隆志、「高効率 LD 励起利得シフト Tm 添加ファイバ増幅器」、
 2001年(平成13年)電子情報通信学会総合大会、C-3-145。